



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

진동이 경량기포토의 강도특성에 미치는 영향

Effect of Vibration on the Strength Characteristics of
Lightweight Air-Trapped Soil



지도교수 김 태 형

2011년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

이 영 준

공학석사 학위논문

진동이 경량기포토의 강도특성에 미치는 영향

Effect of Vibration on the Strength Characteristics of
Lightweight Air-Trapped Soil



지도교수 김 태 형

2011년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과
이 영 준

本 論文을 李永俊의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 서 영 교 (印)

委 員 박 동 천 (印)

委 員 김 태 형 (印)



2011年 2月 28日

韓國海洋大學校 大學院

목 차

목차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적 및 범위	2
제 2 장 기존 연구	3
2.1 경량기포토	3
2.1.1 필요성	3
2.1.2 역학적 특성	3
2.2 진동	13
2.2.1 국내연구	13
2.2.2 국외연구	14
2.2.3 국내외 기준비교	14
제 3 장 실내시험	17
3.1 재료	17
3.1.1 시멘트	17
3.1.2 모래	17
3.1.3 기포제	18
3.1.4 용수	20
3.2 배합계획	20
3.3 공시체 제작	22
3.4 진동시험	24
3.4.1 실험변수	25

3.4.2 진동측정장치	25
3.4.3 진동장치	26
3.4.4 진동시험방법	27
3.4.5 일축압축시험	28
제 4 장 결과 및 분석	30
4.1 Blastmate III의 측정결과	30
4.2 공시체의 외형변화	36
4.3 단위중량(배합비)	38
4.4 진동속도	39
4.5 진동가력시점	39
4.6 현장 적용성	50
4.7 양생일수	54
제 5 장 결 론	56
참고문헌	58
감사의 글	60



List of Tables

Table 2.1	Mixing ratios	4
Table 2.2	Unconfined compressive strength cured under wet condition	5
Table 2.3	Unconfined compressive strength cured under water condition	9
Table 2.4	Unconfined compressive strength and modulus of deformation on unit weight ...	11
Table 2.5	Allowance vibration velocity proposed by ASCE	15
Table 2.6	Hulshizer & Desal standard	16
Table 2.7	Vibration level proposed by the U.S. Department of Transportation	16
Table 3.1	Physical properties of portland cement	17
Table 3.2	Chemical component of portland cement	17
Table 3.3	Physical properties of sand	18
Table 3.4	Chemical component of animality foaming agent	19
Table 3.5	Physical properties of animality foaming agent	19
Table 3.6	Results of detection test	20
Table 3.7	Optimum mixing ratios	21
Table 3.8	Shooting methods	23
Table 3.9	Specification of Blastmate III	26
Table 3.10	Test variable of vibration test	27
Table 4.1	Vibration regulation of several organization	30
Table 4.2	Relations according to the RPM	36
Table 4.3	RPM and distance of motor proposed from vibration velocity	36

List of Figures

Fig. 2.1 Stress-strain behavior of LWS	6
Fig. 2.2 Failure behavior of specimens	6
Fig. 2.3 Relation between unconfined compressive strength and curing time	7
Fig. 2.4 Relation between unit weight and unconfined compressive strength	7
Fig. 2.5 Relation between cement content and unconfined compressive strength	8
Fig. 2.6 Relation between air foam content and unconfined compressive strength	8
Fig. 2.7 Unconfined compressive strength on curing condition	10
Fig. 2.8 Unconfined compressive strength on curing time - water curing	10
Fig. 2.9 Relation between unconfined compressive strength and E_{50} on mixing ratios	12
Fig. 2.10 Relation between unconfined compressive strength and E_{50} on unit weight	12
Fig. 3.1 Grain size distribution curve of sand	18
Fig. 3.2 Relation between cement content and unconfined compressive strength - optimum mixing choice	22
Fig. 3.3 Foam generation equipment	22
Fig. 3.4 Making process of lightweight air-trapped soil	24
Fig. 3.5 Vibration measurement equipment and vibration sensor	26
Fig. 3.6 Vibration equipment and regulator	27
Fig. 3.7 Equipment of unconfined compression test	28
Fig. 3.8 Magnified picture and failure shape of specimen (8-1-0)	29
Fig. 4.1 Vibration velocity and distance from motor according to RPM	31-32
Fig. 4.2 Distribution according to the test number	33-35
Fig. 4.3 Shape variation of specimen according to the vibration and slurry condition	37
Fig. 4.4 Relation between test variable and ratio of strength increase(decrease) (cured 14 days)	40-42
Fig. 4.5 Relation between test variable and ratio of strength increase(decrease) (cured 28 days)	43-45
Fig. 4.6 Relation between time when vibrated and unconfined compressive strength (cured 14 days)	46-47
Fig. 4.7 Relation between time when vibrated and unconfined compressive strength (cured 28 days)	48-49
Fig. 4.8 Regulation of lightweight air-trapped soil about unit weight 6kN/m^3	51
Fig. 4.9 Regulation of lightweight air-trapped soil about unit weight 8kN/m^3	52

Fig. 4.10 Regulation of lightweight air-trapped soil about unit weight 10kN/m^3	53
Fig. 4.11 Comparison with strength decrease about curing time (T0 specimen)	54-55



Effect of Vibration on the Strength Characteristics of Lightweight Air-Trapped Soil

by
Lee, Young Jun

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of
Korea Maritime University



Abstract

Problems of Lightweight Air-Mixed soil related to use in-situ soil are issued today; inhomogeneity, quality control, strength deviation, and etc. In order to solve these problems, lightweight air-trapped soil using a sand is developed. It is possible to produce a homogeneous sand at factory in quantity. Many studies have been studied on the material characteristics. It is applied for design and construction. But after cast-in-place of lightweight air-trapped soil, research related to vibration is incomplete. Thus, this study is conducted to find out the effect of vibration on the strength characteristics of lightweight air-trapped soil under curing process.

As the results of vibration test, weak vibration of 0.26cm/s and 0.42cm/s do not show any particular change of specimen shape and

compressive strength. However vibration velocities of 2.01cm/s and 3.33cm/s show a settlement and decrease of compressive strength of specimen. In order to prevent quality decrease, when lightweight air-trapped soil is applied a construction site, several construction standards should be necessary. Thus this study suggests construction standards about time when vibrated and vibration velocity.

First, it is suggested that the vibration is limited about five hours at construction site. Also in case of 6kN/m^3 and 8kN/m^3 of unit weight, vibration velocity of 1.2cm/s is the maximum allowance velocity. In case of 10kN/m^3 , the maximum allowance velocity is 0.6cm/s.

In conclusion, if lightweight air-trapped soil is applied construction site, in order to prevent quality decrease, special caution about the vibration existed construction site is needed.



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

오늘날 공학과 산업기술의 급속한 발전은 재료특성의 세분화와 혁신적인 개선을 요구하고 있다. 이에 따라 경량성토공법 분야에서도 많은 연구개발 및 투자가 이루어지고 있다. 또한 이를 통해 획기적인 신제품개발에 주력하고 있다. 경량성토공법은 기존의 보통 콘크리트나 토사가 지니고 있는 단점을 보완하고 개선함과 동시에 우수한 복합성능을 부여할 목적으로 개발이 이루어지고 있다. 이에 대한 연구는 선진국에서 이미 시작되어 상당한 수준의 성과를 거두었으며 다양한 형태로 경량성토공법이 만들어지고 사용되어지고 있다.

국내에서는 경량성토공법 중의 하나로 EPS성토공법이 1993년 서해안 고속도로 현장에서 처음으로 적용한 이후, 연약지반상의 교대 뒤편 채움 및 성토재 등의 경량성토를 필요로 하는 곳에 EPS가 주재료로 이용되어 왔다. 하지만 EPS가 갖는 소성변형(크리프)으로 인한 문제점이 노출되기 시작하면서 최근에는 원료토에 물과 시멘트를 첨가하여 유동화시킨 것에 기포를 혼합하는 경량기포혼합토를 적용시키고자 하는 많은 연구가 이루어지고 있다(황중호 등, 2010).

경량기포혼합토는 경량으로 인한 하중경감과 유동성, 시공성 등의 장점으로 일반적인 흙으로는 시공이 곤란한 장소에서의 시공에 적합하다(일본도로공단, 1996; 土田孝 등, 1996). 하지만 윤길림 등(2004)과 송준호(2009), 황중호 등(2010)은 경량기포혼합토가 초기함수비 및 점토, 모래, 실트 등 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 어려움이 있는 것을 밝혀냈다. 이에 현장적용에 있어서는 이들에 대한 철저한 시공관리가 요구된다. 따라서 이러한 경량기포혼합토의 단점이 보완된 품질이 균질한 대체 경량기포재료의 개발이 요구되었다.

황중호(2010)는 원료토로 준설토를 사용하는 경량기포혼합토의 단점을 보완하기 위하여 공장에서 생산된 균질한 품질의 모래를 사용하였으며 이를 통해 만들어진 경량재료를 경량기포토라 명명하였다. 즉, 경량기포토란 공장에서 생산된 균일한 품질의 모래와 시멘트와 같은 고화재, 그리고 물을 혼합하여 슬러리화 시킨 후 기포를 주입하여 만든 경량성토재를 말한다. 기초적인 연구로 균질한 품질의 경량기포토의 압축특성을 검토하였다. 연구 대상은 모래가 전혀 포함하지 않은 경량기포토와 품질이 균질한 모래를 포함한 경량기포토에 대해 시험이 실시되었다. 총 16가지의 재료배합을 설정하였고, 경량기포토에서 가장 중요한 역학적 특성인 압축강도에 대한 분석을 실시하였다.

이를 통해 소요 단위중량에 대한 압축강도 및 변형 특성을 파악하여 최적의 경량기포토에 대한 기초자료가 제시되었다.

그러나 경량기포토의 현장적용에 있어 문제가 될 수 있는 요인에 대한 검토는 폭넓게 이루어지지 않았다. 그 요인들은 여러 가지가 있을 수 있는데, 본 논문에서는 그 중에서 진동에 대한 요인을 다루었다. 경량기포토 내부의 기포문제와 관련하여 최근 국내의 대규모 건설현장에서는 각종 건설기계, 발파 및 차량으로 인한 진동문제가 급증하고 있다. 콘크리트의 경우 타설과 양생이 동시에 이루어지고 있어 이 때 주위 진동의 영향에 대하여 많은 문제가 제기되고 있다. 이러한 진동은 기존 구조물의 안전성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 시공 중에 있는 건물, 특히 양생 중에 있는 구조물의 강도 및 품질에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(이지은 등, 2000). 하지만 현재까지 경량성토재로 쓰이는 경량기포토의 진동에 따른 강도 및 품질에 대한 연구는 전혀 이루어지고 있지 않기 때문에 이러한 연구가 요구되고 있다. 경량기포토는 그 특성상 내부에 많은 기포를 포함하고 있기 때문에 양생 전 외부 진동에 대해 취약한 단점이 있을 것으로 예상되며, 그 영향 정도는 콘크리트의 품질에 미치는 영향보다 훨씬 더 클 것으로 예측된다.

1.2 연구의 목적 및 범위

본 연구에서는 진동이 경량기포토의 양생과 압축강도에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구가 이루어졌다. 경량기포토가 기존 구조물에 인접해서 시공 시 주변 환경, 특히 진동의 영향을 받는 경우가 종종 발생되고 있다. 예를 들어 파일 항타, 발파 및 기존 도로상의 차량진행으로 인한 진동이 경량기포토의 품질저하에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 현재 국내에서 진동이 일반콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구는 많이 이루어지고 있지만 경량기포토에 대한 진동 영향연구는 미흡한 실정이다. 또한 일반콘크리트나 보통지반의 경우 진동에 대한 검증방법이나 허용기준이 정해져 있어 진동을 규제하고 피해를 최소화시킬 수 있지만 현재 경량기포토의 진동에 대한 구체적인 기준이 없어 실무적용에 어려움을 겪고 있다. 따라서 본 논문에서는 실내시험을 통해 각 시험변수에 따른 진동에 대한 경량기포토의 거동을 분석하고자 한다.

제 2 장 기 존 연 구

2.1 경량기포토

2.1.1 필요성

서론에서 언급한 바와 같이 경량기포혼합토의 경우 현장에서 발생하는 다양한 원료 토에 따라, 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 어려움이 있는 것이 사실이므로 현장적용에 있어서는 이들에 대한 철저한 시공관리가 요구되는 것을 알 수 있다. 현재 국내에서도 현장에서 발생된 원료토를 이용하는 경량기포혼합토공법을 사용하고 있는데 품질관리에 많은 문제점을 갖고 있어 대부분 단위중량이 10kN/m^3 로 시공이 이루어지고 그 이하의 단위중량으로는 시공이나 설계가 이루어지지 않고 있다. 따라서 이에 대한 단점을 보완하는 문제가 시급한 실정이며, 경량기포혼합토의 문제점에 대한 해결방안으로 원료토 대신 공장에서 생산된 입도 등이 균질한 모래를 사용하여 품질이 균질한 경량기포토의 제작 및 그에 대한 기초자료가 제공되었다(황중호, 2010).

2.1.2 역학적 특성

경량기포토의 역학적 특성을 밝히기 위해 16가지 배합비가 검토되었다(황중호, 2010). 1~4번의 배합은 모래를 포함하지 않은 상태에서의 강도를 측정하여 모래의 첨가량에 따른 변화를 알아보기 위한 배합이며, 5~16번의 배합은 시멘트-모래의 비에 따른 변화를 알아보기 위한 배합으로 시멘트-모래의 비를 1:1~1:3으로 설정되었다(Table. 2.1).

Table 2.1 Mixing ratios (Hwang, 2010)

구 분		슬러리			시멘트 슬러리 중량:①	기포군			기포슬러리 밀도:①+② (kN/m ³)
No.	γ -C-S	시멘트	잔골재	수량		기포제	회석수량	기포군중량:②	
1	4-1-0	245	0	122.5	367.5	0.64	31.35	31.99	4
2	6-1-0	380	0	190	570	0.55	27.02	27.57	6
3	8-1-0	515	0	257.5	772.5	0.46	22.7	23.16	8
4	10-1-0	655	0	327.5	982.5	0.37	18.21	18.58	10
5	6-1-1	217	217	143.2	577.2	0.55	26.83	27.38	6
6	8-1-1	294	294	194	782	0.46	22.45	22.91	8
7	10-1-1	370	370	244.2	984.2	0.37	18.12	18.49	10
8	11-1-1	407	407	268.6	1082.6	0.33	16.01	16.34	11
9	6-1-2	147	294	132.3	573.3	0.54	26.7	27.24	6
10	8-1-2	200	400	180	780	0.45	22.19	22.64	8
11	10-1-2	253	506	227.7	986.7	0.36	17.68	18.04	10
12	11-1-2	278	556	250.2	1084.2	0.32	15.55	15.87	11
13	6-1-3	110	330	132	572	0.54	26.6	27.14	6
14	8-1-3	150	450	180	780	0.45	21.88	22.33	8
15	10-1-3	188	564	225.6	977.6	0.36	17.49	17.85	10
16	11-1-3	208	624	249.6	1081.6	0.31	15.18	15.49	11

시멘트-모래 비에 따라 단위중량을 달리하여 설정한 배합비로 제작된 공시체를 각각 3회씩 일축압축시험하여 얻어진 평균값을 요약한 결과는 Table 2.2와 같다.

Table 2.2 Unconfined compressive strength cured under wet condition (Hwang, 2010)

구 분		양생기간				
No.	(γ -C-S)	3일	14일	28일	기전(28일)	60일
1	4-1-0	-	-	191	-	-
2	6-1-0	-	-	1085	-	-
3	8-1-0	-	-	2292	2004	-
4	10-1-0	-	-	4940	-	-
5	6-1-1	-	528	584	-	-
6	8-1-1	-	-	1089	997	-
7	10-1-1	-	1542	2239	-	-
8	11-1-1	-	-	4363	-	-
9	6-1-2	-	186	234	-	-
10	8-1-2	254	318	419	369	445
11	10-1-2	340	-	1456	-	-
12	11-1-2	490	-	1572	-	-
13	6-1-3	측정불가	-	65	-	-
14	8-1-3	측정불가	-	192	168	-
15	10-1-3	230	-	908	-	-
16	11-1-3	230	-	1040	-	-

경량기포토는 Fig. 2.1과 같이 시멘트 함유율이 높고 단위중량이 증가 할수록 응력-변형 거동은 피크 값이 뚜렷하고 기울기가 증가하였으며, Fig. 2.2(a)와 같이 수직에 가깝고 취성적으로 파괴되었다. 반면에 시멘트의 함유율이 낮고 단위중량이 감소할수록 변형계수가 감소하고 Fig. 2.2(b)와 같이 전체적으로 스펀지처럼 시료의 상부 또는 하부에서 압축되며 연성적으로 파괴되는 거동을 보였다.

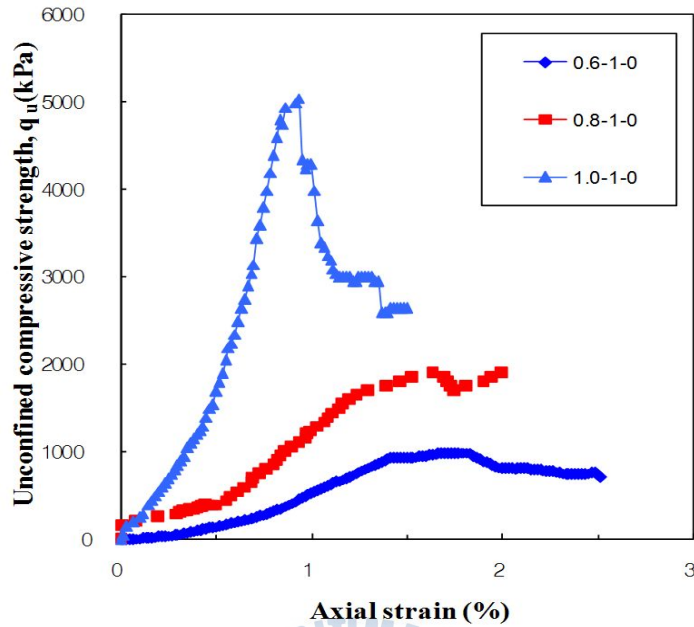


Fig. 2.1 Stress-strain behavior of LWS (Hwang, 2010)



(a) High cement content

(b) Low cement content

Fig. 2.2 Failure behavior of specimens (Hwang, 2010)

양생기간이 경과하고 단위중량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하였으며 시멘트의 함유율이 높을수록 급격하게 증가하는 경향을 나타냈다(Figs. 2.3~2.5). 또한 공기함유율이 대략 30~40%의 범위에서 일축압축강도가 급격하게 감소하여 공기량이 40%를 초과하는 경우에는 품질에 세심한 주의가 요구된다(Fig. 2.6).

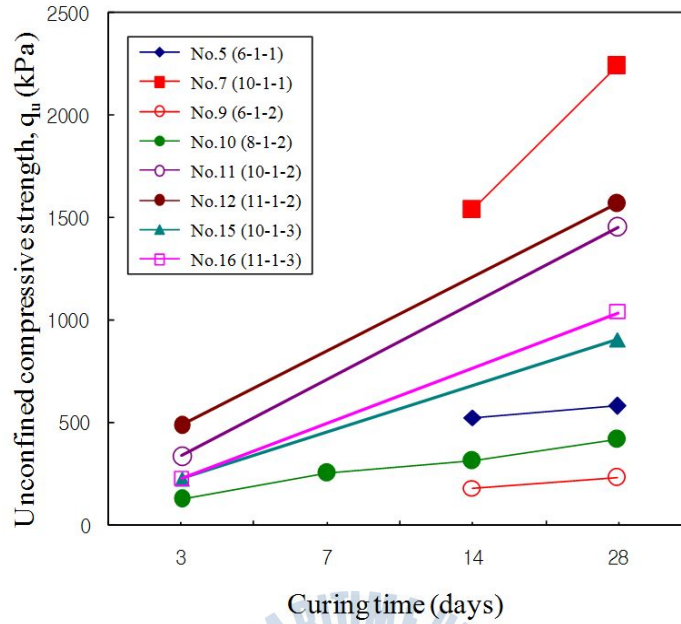


Fig. 2.3 Relation between unconfined compressive strength and curing time (Hwang, 2010)

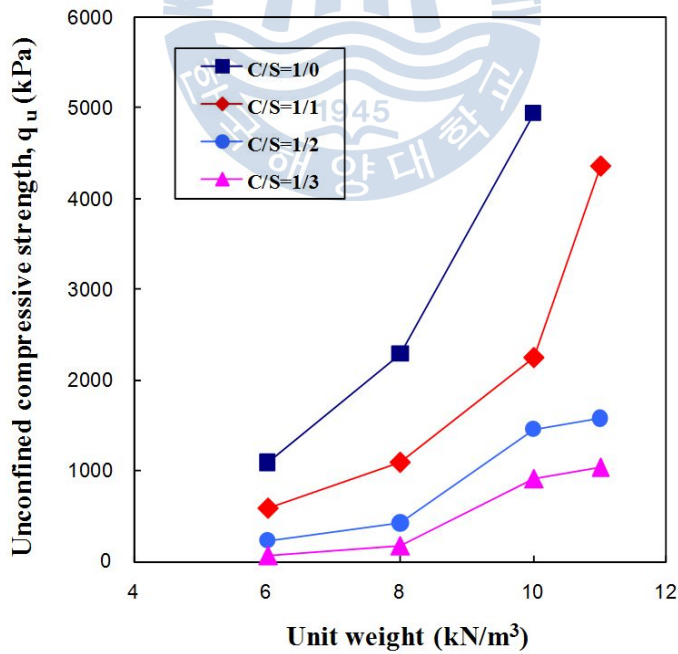


Fig. 2.4 Relation between unit weight and unconfined compressive strength (Hwang, 2010)

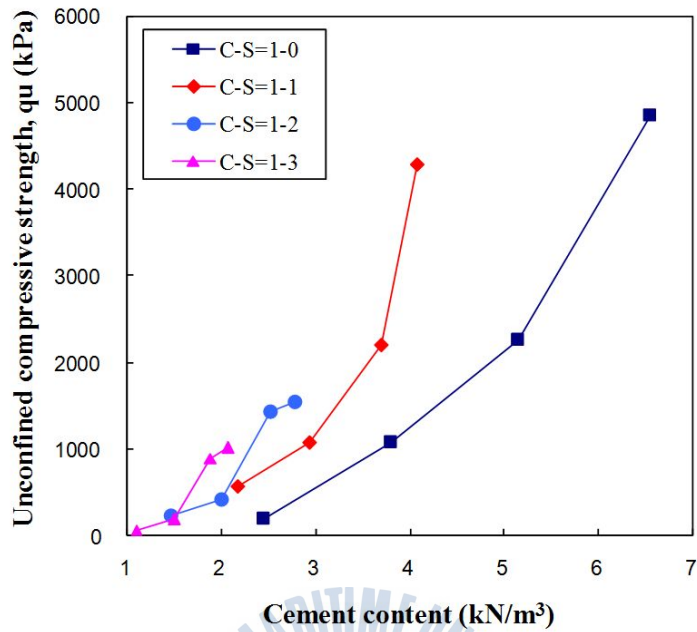


Fig. 2.5 Relation between cement content and unconfined compressive strength
(Hwang, 2010)

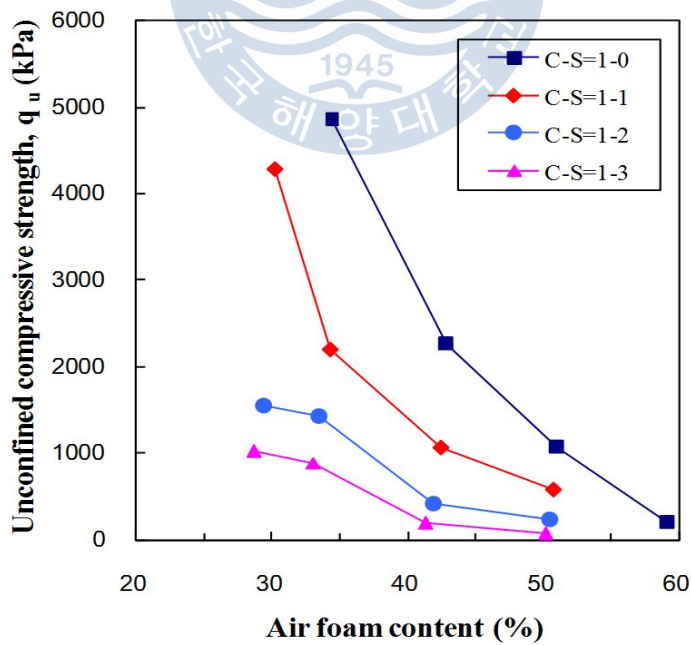


Fig. 2.6 Relation between air foam content and unconfined compressive strength
(Hwang, 2010)

경량기포토를 몰드에 타설한 후 48시간 이내에 탈형하여 후 물 속에서 수중양생 시킨 공시체에 대하여 일축압축시험을 한 결과는 Table 2.3과 같다. 공기 중에서 양생한 경우의 일축압축강도는 습윤 양생한 경우에 비하여 8.5~12.6% 정도의 감소율을 보이며 다소 작은 일축압축강도 결과를 보인다(Fig. 2.7).

Table 2.3 Unconfined compressive strength cured under water condition (Hwang, 2010)

구 분		양생 기간		
No.	(γ -C-S)	7일	28일	28일(습윤양생)
1	4-1-0	149	158	191
2	6-1-0	195	204	1085
3	8-1-0	236	288	2292
4	10-1-0	311	419	4940
5	6-1-1	241	278	584
6	8-1-1	291	309	1089
7	10-1-1	217	279	2239
8	11-1-1	327	324	4363
9	6-1-2	146	256	234
10	8-1-2	189	208	419
11	10-1-2	289	326	1456
12	11-1-2	293	407	1572
13	6-1-3	210	202	65
14	8-1-3	205	258	192
15	10-1-3	363	414	908
16	11-1-3	534	594	1040

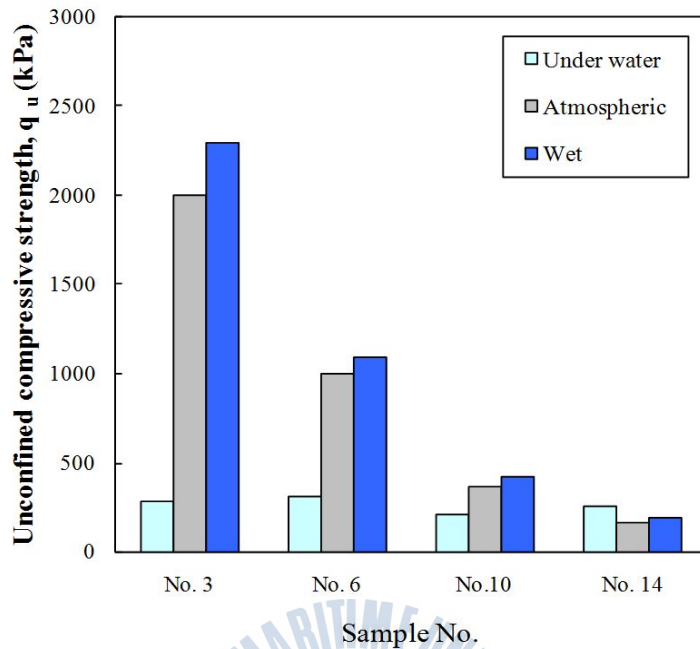


Fig. 2.7 Unconfined compressive strength on curing condition
(Hwang, 2010)

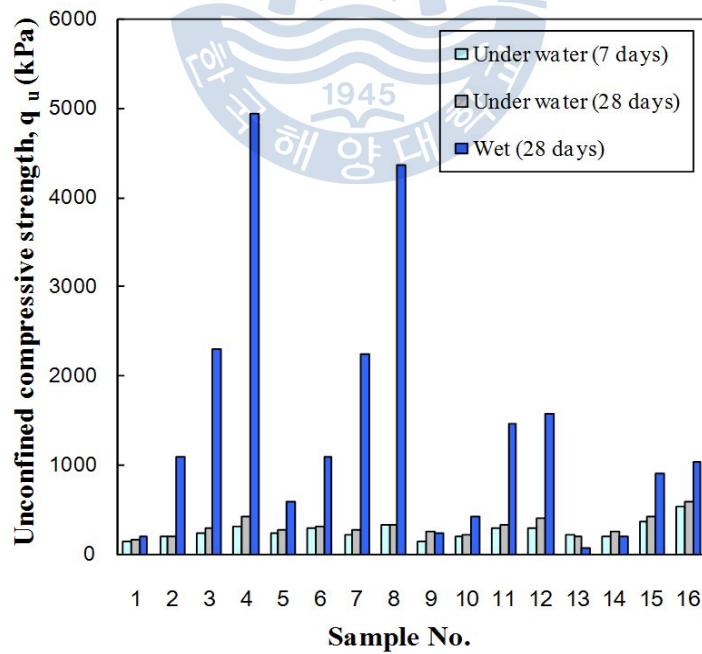


Fig. 2.8 Unconfined compressive strength on curing time - water curing
(Hwang, 2010)

수중 양생한 경우에는 양생 7일 공시체와 양생 28일 공시체의 일축압축강도의 차이가 적은 것으로 보아 습윤 양생한 경우에 비해 시멘트의 강도발현이 거의 되지 않은 것으로 보이며 모래 함유량이 많을수록 더 높은 일축압축강도가 나타났다(Fig. 2.8). 따라서 경량기포토를 수중에 타설해야 하는 경우에는 차수 처리를 하거나 별도의 첨가제나 혼화제가 필요할 것으로 판단된다. 또한 수중 양생하는 경우에는 수압에 의한 소포량의 증가가 예상되므로 이를 고려한 수정 배합이 필요할 것으로 보인다.

28일 양생된 경량기포토의 일축압축강도와 변형계수 E_{50} 의 관계는 Fig. 2.9와 같이 나타났다. 이 관계를 수식으로 나타내면 식 (2.1)과 같고 기존의 연구에서와 유사한 범위를 가지는 것으로 나타났다.

$$E_{50} = (60 \sim 150) \cdot q_u \quad (2.1)$$

여기서, E_{50} : 변형계수

q_u : 일축압축강도

경량기포토의 단위중량이 증가할수록 변형계수는 크게 나타났으며, 동일한 하중에서 더 많은 변형을 유발하는 것을 나타낸다(Table 2.4).

Table 2.4 Unconfined compressive strength and modulus of deformation on unit weight (Hwang, 2010)

단위중량 (kN/m ³)	관계식
6	$E_{50} = 53.26q_u$
8	$E_{50} = 91.99q_u$
10	$E_{50} = 114.91q_u$
11	$E_{50} = 100.59q_u$

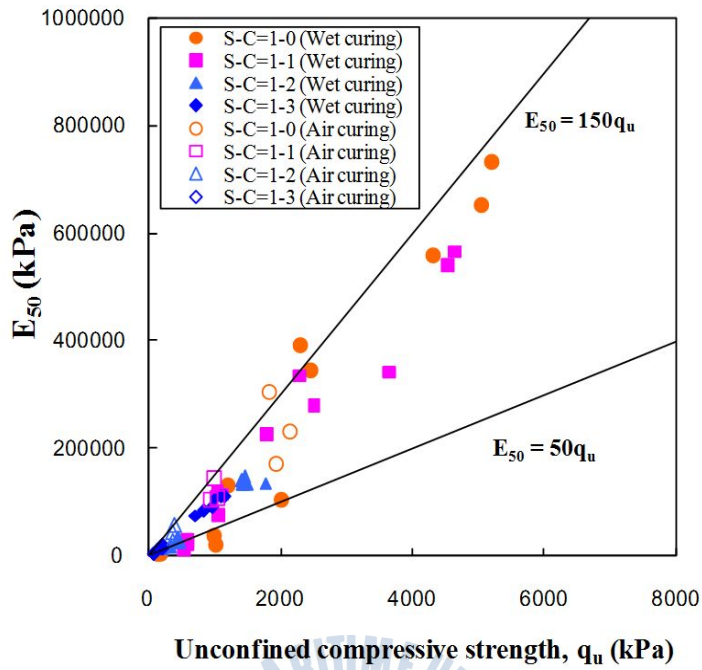


Fig. 2.9 Relation between unconfined compressive strength and modulus of deformation E_{50} on mixing ratios (Hwang, 2010)

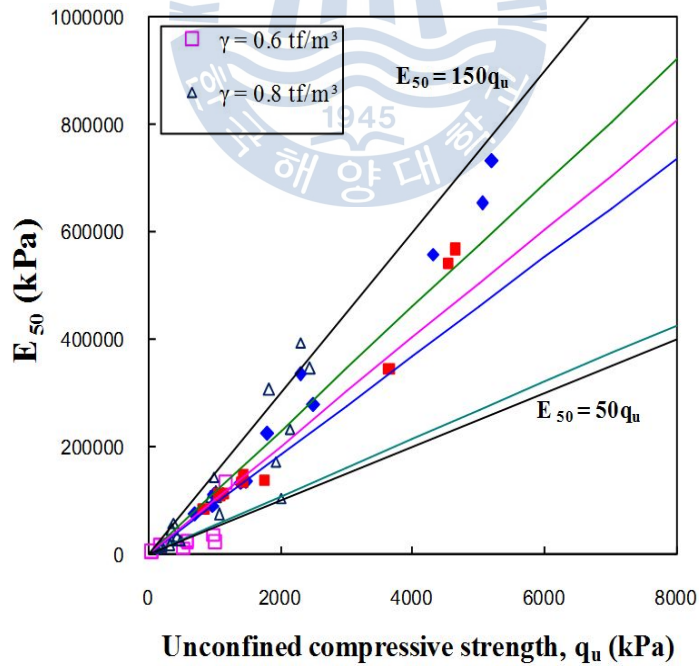


Fig. 2.10 Relation between unconfined compressive strength and E_{50} on unit weight (Hwang, 2010)

2.2 진동

2.2.1 국내연구

경량기포토와 관련된 진동에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 관계로 대부분의 기존 연구는 콘크리트에 대한 자료이다.

대한주택공사(1990)는 경화중인 콘크리트에 진동이 가해지는 시점, 시간 및 진동의 크기를 0.0002cm/sec, 0.00025cm/sec, 0.00075cm/sec, 0.0018cm/sec, 1.2cm/sec, 4.8cm/sec까지 변화시키며 28일 후의 콘크리트 강도를 측정하였다. 그 결과 타설 후 3~5시간에 작용하는 진동은 콘크리트강도를 떨어뜨리고, 진동의 크기는 별다른 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주었다.

권영웅 등(1990)은 ‘진동이 주변 구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향’에서 임의로 정해진 시간 이후에 쇄망치로 이용하여 몰드에 충격을 가하는 방식으로 실험을 수행하여, 콘크리트의 양생 초기에 가한 충격의 정도가 클수록 콘크리트의 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다고 하였다.

오병환 등(1998)은 ‘양생중인 콘크리트에 미치는 진동의 영향 연구’를 통해 진동속도와 진동가력시점을 실험변수로 두고 압축강도와 부착강도, 응결시간을 측정하였다. 그 결과, 진동가력시점에 의한 영향은 없었으며, 진동속도 0.25~0.5cm/sec에서 굳지 않은 콘크리트에 나쁜 영향을 미치기 시작하는 것으로 나타났다고 하였다. 진동속도가 0.25cm/sec일 경우 압축강도는 최대 27.51%의 강도 증가를, 부착강도는 11.51%의 강도를 증가시키는 결과를 가져왔다. 진동속도가 0.5cm/sec 이상의 경우에는 압축강도는 최대 11.38%의 강도 감소를, 부착강도는 12.71%의 강도를 감소시키는 결과를 가져왔다.

김광수 등(2004)은 ‘수직진동이 초기양생중인 콘크리트의 강도에 미치는 영향에 관한 실험적 연구’를 통해 진동속도와 진동가력시간을 실험변수로 두고 압축강도와 부착강도를 측정하였다. 그 결과, 부착강도의 경우 진동속도가 0.3cm/sec에서는 진동가력 시간에 따라 점차적으로 증대되어 최대 22.21%의 부착강도 증대를 가져왔으며, 진동속도가 0.45~0.6cm/sec범위에서는 초기 3시간에서 강도의 증가가 나타난 이후 12시간까지 강도가 감소하는 것을 고찰할 수 있었으며, 24시간에서는 대략 7% 정도의 강도가 회복되는 것을 고찰하였다고 한다. 따라서, 진동가력 6시간 이내의 진동을 받는 경우, 0.3cm/sec 이하를 유지하고 진동가력 12~24시간의 경우에는 0.6cm/sec 이하를 유지해야 한다는 결론을 얻었다.

김종수 등(2005)은 ‘초기양생 중에 수직방향 연속진동을 받은 콘크리트의 강도 특성’

에서 진동속도와 진동가력시간을 실험변수로 두고 압축강도, 쪼갬인장강도, 부착강도를 측정하였다. 그 결과, 압축강도는 진동속도가 증가함에 따라 강도의 감소율이 전반적으로 증가하는 경향(최대 33.2%)을 보여주었으며, 쪼갬인장강도는 진동속도가 커지면 전반적으로 감소하는 경향(최대 19.5%)을 보여주었다. 부착강도는 진동속도에 따라 증가(최대 32.5%) 또는 감소(최대 37.5%)하는 경향을 보였다(최두리, 2006).

2.2.2 국외연구

Bastian(1970)은 콘크리트 타설 직후 7.6cm/sec의 파일향타 진동속에서 3일간 양생된 콘크리트와 진동을 가하지 않고 양생한 콘크리트를 비교하였다. 실험결과, 진동은 콘크리트의 응결과 양생기간동안에 악영향을 주지 않는다는 결론을 얻었으며, 오히려 압축강도는 향타진동을 받은 시험체가 무진동 양생된 경우보다 약 4% 높은 강도로 나타났다.

Esteves(1978)는 양생초기 5~20시간 사이의 콘크리트에 대해 실험을 수행하였다. 진동은 콘크리트가 놓인 철판을 큰 해머로 때려서 발생시켰다. 콘크리트의 양생기간에 따라 진동속도가 15.24cm/sec에서 20.32cm/sec까지 균열생성을 볼 수 있었다. 이 실험에 의하면 진동이 균열에 나쁜 영향을 주는 시간은 11~16시간까지임을 알 수 있다.

Howes(1979)는 진동의 영향을 연구하기 위해 현장발파와 같은 주기의 범위를 갖는 진동속도를 발생시키는 진동기를 제작하였다. 또한 진동수가 20~50Hz 범위에서 일주일동안 1시간 간격을 두고 여러 다른 압축시험 공시체에 3.048cm/sec, 8.128cm/sec, 12.7cm/sec의 진동속도를 가하였다. 압축강도와 인장강도 및 밀도 등을 양생 후 7일과 28일에 각각 측정하였다. 실험 결과, 진동은 콘크리트의 강도나 물리적 성질에 영향을 주지 않는다는 것을 나타냈다.

Hulshizer(1984)는 발파진동이 굳지 않은 콘크리트에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 실내실험과 현장실험을 수행하였다. 현장실험으로는 압축강도실험, 보시험, 벽체실험을 수행하였고, 실내실험으로는 압축강도 시험체와 부착강도 시험체를 고정된 주기를 가지고 여러 진동속도를 양생시간 별로 가하였다.

2.2.3 국내외 기준비교

경량기포토와 관련된 진동기준은 현재 국내에서 전혀 제안되어 있지 않다. 따라서 본 장에서 언급될 기준은 콘크리트에 대해 적용된 기준이다.

(1) 국내기준

국내에서는 현재까지 콘크리트 표준시방서 및 도로교 표준시방서에서는 콘크리트는 양생기간 중에 예상되는 진동, 충격, 하중 등의 유해한 작용으로부터 보호되어야 한다고만 기술되어 있고 구체적인 진동이나 충격의 제한치 등은 명시하지 않고 있다. 그래서 몇몇 현장에서는 국외 기준을 적용하여 사용하기도 하지만 국외 기준들의 제한치도 콘크리트 타설 후 3~11시간 동안 0.254cm/sec에서 10cm/sec로 그 값의 차이가 현저하기 때문에 국내 실정에 맞는 기준의 제안이 필요한 실정이다.

(2) 국외기준

발파진동이나 파일항타 시의 진동은 그 진동속도나 진동가력시점에 따라서 콘크리트에 미치는 영향이 다를 수 있다. 따라서, 이러한 진동영향을 고려하기 위해 다음과 같은 허용진동기준을 정하여 사용하고 있다. 1970년 미국토목학회(ASCE)에서는 다음과 같은 기준을 정하였다. 콘크리트 타설 후 12시간 이내의 콘크리트에는 0.254cm/sec의 낮은 기준을 적용하도록 하였고, 재령시간이 길어질수록 허용할 수 있는 최대진동속도가 높아진다.

Table 2.5 Allowance vibration velocity proposed by ASCE(1970)

타설 후 경과시간	허용 진동치 (cm/sec)
0 ~ 12시간	0.254
12 ~ 24시간	1.27
1 ~ 5일	1.27 ~ 5.08
	타설 후 시간과 비례적으로 증가
5일 이상	5.08

1984년, Hulshizer는 발파진동이 굳지 않은 콘크리트에 미치는 영향에 대한 실험을 통해 28일 강도에 내구성이 적어지는 결과를 초래한다는 증거가 없어 다음과 같은 규정을 제시하였다. 그러나 이는 너무 큰 진동 허용수치로서 많은 논란이 되어왔다.

Table 2.6 Hulshizer & Desai standard (1984)

타설 후 경과시간	허용 진동치 (cm/sec)
0 ~ 3	10.16
3 ~ 11	3.81
11 ~ 24	5.08
24 ~ 48	10.16
48 이상	27.78

1991년, 미국교통국은 양생콘크리트에 대한 진동수준 지침을 발표하였으며, 콘크리트 타설 후 4시간까지는 5.08cm/sec까지 허용하도록 하였고 4~24시간 동안에는 0.63cm/sec로 진동수준을 제한하였다.

Table 2.7 Vibration level proposed by the U.S. Department of Transportation (1991)

타설 후 경과시간	허용 진동치 (cm/sec)
0 ~ 4시간	5.08
4 ~ 24시간	0.63
1 ~ 3일	2.54
3 ~ 7일	5.08
7 ~ 10일	12.70
10일 이상	25.40

이 외에도 국외에서는 많은 기준들이 제안되고 있으며, 각각의 기준이나 제안치들의 최대진동속도 크기가 다양하다. 외국의 시설물과 국내의 시설물은 그 구조 및 기초 지반상태가 다르기 때문에 콘크리트의 피해 정도가 다른 것은 물론이며, 콘크리트 타설에 따른 배합비 등 시방기준도 서로 다르기 때문에 외국의 허용기준치를 그대로 적용할 수도 없다. 현재 국내에서는 외국의 기준들을 적용하여 사용하고 있기도 하지만 법적인 규제가 없어 발파진동이나 각종 진동에 대한 관리가 미흡한 실정이다. 게다가 외국의 어떤 기준을 적용해야 할지도 의문이며 국내의 실정에 맞는 적절한 기준 제정이 필요한 실정이다(최두리, 2006).

제 3 장 실 내 시 험

3.1 재료

3.1.1 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201의 규정에 적합한 H사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 물리적 성질과 화학적 성분은 각각 Table 3.1, Table 3.2와 같다.

Table 3.1 Physical properties of portland cement

비중	분말도 (cm ² /g)	응결		안정도 (%)	압축강도(MPa)		
		초결(분)	종결(분)		3일	7일	28일
3.15	3,354	205	275	0.09	28.8	39.1	52.2

Table 3.2 Chemical component of portland cement

성 분	CaO	SiO ₂	AlO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	강열감량	Free CaO	Insol 불용잔물
함량(%)	61.3	21.1	5.2	2.73	2.8	1.81	1.62	0.6	0.2

3.1.2 모래

본 연구에서는 품질이 비교적 균일한 경량기포토의 제작을 위해 균질하게 생산되는 모래를 사용하였으며, 입도분포곡선은 Fig. 3.1과 같으며 유효입경(D₁₀)은 약 0.15mm이다. 모래의 물리적 특성은 Table 3.3과 같다.

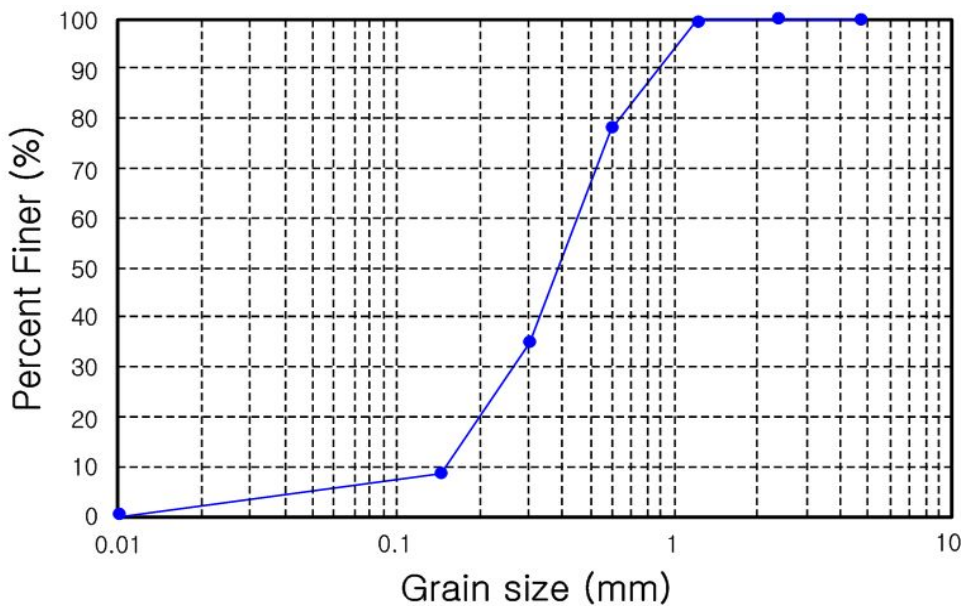


Fig. 3.1 Grain size distribution curve of sand

Table 3.3 Physical properties of sand

입경(mm)	흡수율(%)	단위중량(kN/m ³)	비 중
0.6이하	1.18	16.86	2.65

3.1.3 기포제

현재 국내에서 사용되는 기포제는 식물성기포제, 동물성기포제, 고분자기포제등이 있으며 콘크리트의 양생과 장기적인 사용에 악영향을 주지 않는 것을 사용해야 한다. 본 연구에서는 환경적으로 무해하며 물의 영향을 배제시킬 수 있는 동물성기포제를 사용하였다.

(1) 식물성기포제

합성계면활성제의 일종으로 실생활에서 쉽게 접할 수 있는 주방세제와 비슷한 종류로써 투명한 액체의 성상을 나타낸다. 동관이나 강관에 직접 닿아도 부식의 위험이 없으며, 동물성 기포제를 사용하는 것보다 유동성이 뛰어나 형성된 면의 평활성이 우수한 반면에 투수성이 높다고 알려져 있다.

(2) 고분자기포제

고분자기포제는 폴리아크릴레이트 성분의 고분자 중합체로서 담황색으로 pH 7로 중성이고 발포시 백색크림 같은 상태이며 내부에는 0.1~0.4mm크기의 기포균이 형성되고 황산염이나 염화물 등이 들어있지 않아 부식되지 않는다는 장점을 가지고 있다. 시멘트 입자는 보통 혼합을 하여도 시멘트 입자간의 응집작용이 물의 습윤작용보다 크기 때문에 10~30%정도는 응집된 상태로 남아 있는데, 고분자기포제의 경우 시멘트 입자의 분산효과가 있어 작업성을 증대시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 고분자기포제는 이온수에 폴리머를 서서히 투입한 다음 80~90℃로 가열하여 3시간 동안 교반하여 용해시킨 후에 계면활성제와 기포 안정제를 차례로 투입하여 교반하고 숙성시키는 과정을 통하여 제조한다.

(3) 동물성기포제

단백질계 기포제로서 단백질의 원료로는 동물의 혈액, 유제성분인 카세인, 동물의 뼈, 뿔의 분말인 젤라틴 등이 있다. 이들은 여러 종류의 아미노산으로 구성되어 있고 이것을 알칼리로 가수분해하여 중화 후 여과한 것을 철염이나 방부제를 첨가한 기포제이다. 동물성 기포제의 일반적인 화학적 성분은 Table 3.4와 같다(이수형, 2005).

Table 3.4 Chemical component of animality foaming agent (unit : %)

H ₂ O	Protein	NaCl	NH ₄ Cl	CaCl ₂	MgCl ₂	FeSO ₄
36	32	10	1	6	5	10

본 연구에서는 사용된 H사의 동물성 단백질계 기포제는 동물의 잔재물인 뿔, 발톱, 털 등을 가수분해한 후 단백질을 추출하여 제조한 제품이며, 이 폐기물은 처리하는데 막대한 연료비와 발생되는 유해물로 인하여 매연과 지하수 오염을 유발하므로 매우 친환경적인 기포제로소 물리적 특성은 Table 3.5와 같다.

Table 3.5 Physical properties of animality foaming agent

비중	점도(cP)	고형분(%)	pH	기포균 단위중량(kN/m ³)
1.18	37.3	39.1	6.29	0.541

본 시험에 사용된 기포제는 납, 카드뮴, 수은 등의 중금속 검출시험에서 Table 3.6과 같이 모든 경우에 대해 만족되는 결과를 나타내었다.

Table 3.6 Results of detection test

(unit : mg/kg)

항 목	검출한계	결 과	시험 방법	분석장비
납(Pb)	5	불검출	EPA 3050B	ICP-AES
카드뮴(Cd)	1	불검출	EPA 3050B	
수은(Hg)	1	불검출	EPA 3052	
6가 크롬(Cr ⁶⁺)	1	불검출	USEPA 3060A	UV-VIS. Spectrophotometer

3.1.4 용수

경량기포토에 사용되는 물은 유해한 불순물인 기름·산·알칼리·염류·유기물 등을 포함하지 않은 청정한 것이라야 한다. 해수는 철근 또는 PC강선을 부식시킬 염려가 있으므로 철근콘크리트의 혼합수로 사용해서는 안된다. 콘크리트용수로서는 수돗물·하천수·호소수 등을 이용할 수 있으나 만약 공장폐수 등으로 오염된 하천수·호소수·저장수 등을 이용하게 되면 황산염·유화물·붕산염·탄산염·아연·구리·주석·망간 등의 화합물이나 알칼리 등의 무기물 및 당류(糖類)·펄프폐액·부식물질 등의 유기물이 함유되어 있는 수가 있으므로 적은 양이라도 이와 같은 물질을 함유하는 물을 혼합수로 사용하면 시멘트의 경화강도의 발현·체적변화·백화(eflorescence)·위커빌리티 등에 나쁜 영향을 미치는 수가 있다. 따라서 이와 같은 오염의 염려가 있는 물을 사용할 경우에는 물을 화학적으로 분석하여 유해물물의 함유량을 조사하여 사용여부를 판정하는 것이 좋다. 따라서 본 실험에서 사용된 물은 KASS 05010.2.1.3의 규정에 따라 상수도수를 사용하였다.

3.2 배합계획

본 연구에서는 황중호(2010)가 경량기포토에 대해 실시한 16가지 배합비 중 3가지 배합을 연구대상으로 선택하였다.

배합선택은 압축강도 1000kPa을 기준으로 하였고 해당되는 범위의 배합을 선정하였다(Fig. 3.2). 경량기포토의 기존연구나 현장시공사례를 비롯해 보았을 때, 주적용분야가 연약지반 상의 도로 성토재인 것을 알 수 있다. 보통의 경우 도로의 성토하중과 교

통하중을 고려한 하중조건은 500kPa 내외의 값을 지닌다. 이 값에 안전율을 고려하여 1000kPa을 기준강도로 정하였다.

각 배합에 대한 플로우값은 $200 \pm 20\text{mm}$ 이며, 플로우값의 측정은 KS F 4039:2004에 따라 크기 $350 \times 350\text{mm}$ 유리판위에 내경 80mm, 높이 80mm인 아크릴 원통을 사용하여 측정하였다. 플로우값은 경량기포토의 펌프 압송과 협소부의 충전을 위한 중요한 특성이다.

Fig. 3.7의 배합표는 시멘트, 잔골재, 물 및 기포군의 비중에 따른 체적설계를 바탕으로 구성되어 있다. 구체적으로 물의 비중 1을 기준으로 하여 시멘트의 비중 3.15, 잔골재의 비중 2.1, 기포군의 비중 0.04를 고려하여 배합설계를 실시하였으며, 수량은 시멘트-모래비에 따라 다른 비율로 첨가되었다.

Fig. 3.7 Optimum mixing ratios

구 분		슬러리(kg)			시멘트 슬러리 중량:①	기포군(kg)			기포슬러리 밀도:①+② (kN/m^3)
No.	γ -C-S	시멘트	잔골재	수량		기포제	희석수량	기포군중량:②	
1	4-1-0	245	0	122.5	367.5	0.64	31.35	31.99	4
2	6-1-0	380	0	190	570	0.55	27.02	27.57	6
3	8-1-0	515	0	257.5	772.5	0.46	22.7	23.16	8
4	10-1-0	655	0	327.5	982.5	0.37	18.21	18.58	10
5	6-1-1	217	217	143.2	577.2	0.55	26.83	27.38	6
6	8-1-1	294	294	194	782	0.46	22.45	22.91	8
7	10-1-1	370	370	244.2	984.2	0.37	18.12	18.49	10
8	11-1-1	407	407	268.6	1082.6	0.33	16.01	16.34	11
9	6-1-2	147	294	132.3	573.3	0.54	26.7	27.24	6
10	8-1-2	200	400	180	780	0.45	22.19	22.64	8
11	10-1-2	253	506	227.7	986.7	0.36	17.68	18.04	10
12	11-1-2	278	556	250.2	1084.2	0.32	15.55	15.87	11
13	6-1-3	110	330	132	572	0.54	26.6	27.14	6
14	8-1-3	150	450	180	780	0.45	21.88	22.33	8
15	10-1-3	188	564	225.6	977.6	0.36	17.49	17.85	10
16	11-1-3	208	624	249.6	1081.6	0.31	15.18	15.49	11

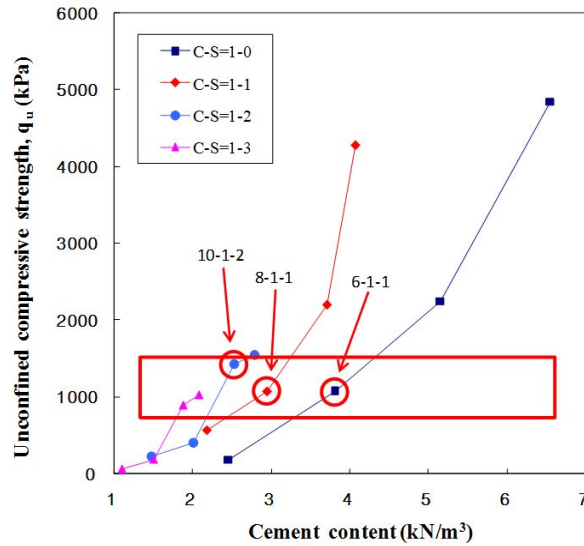


Fig. 3.2 Relation between cement content and unconfined compressive strength
- optimum mixing choice

3.3 공시체 제작

기포는 소정의 희석비율이 되도록 물로 희석한 기포제를 압축공기와 함께 발포장치에 넣어 넣고 소정의 발포비율이 되도록 공기압을 조절하여 제조한다(하이그레이드스 일 연구컨소시엄, 1996). 본 연구에서는 실내 실험용 공시체의 제작을 위해 Fig. 3.3과 같은 소규모의 기포발생장치를 제작하여 사용하였다.

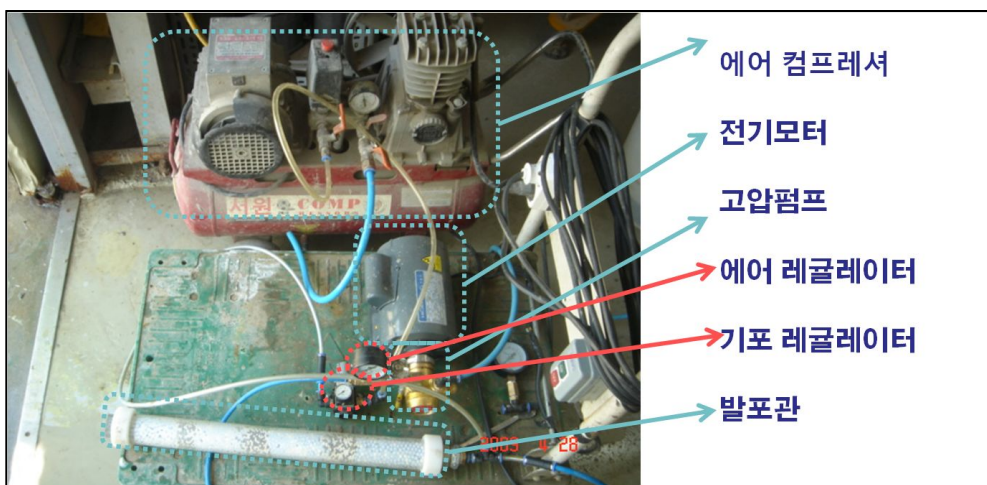


Fig. 3.3 Foam generation equipment

기포를 경량기포토에 포함시키는 방법은 Table 3.8과 같이 세 가지가 있다. 본 연구에서는 기포발생장치를 통해 발생한 기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 선기포 방식을 사용하였다.

Table 3.8 Shooting methods (Lee, 2005)

분 류	기포제의 종류	특 징
※선기포 방식	동물성 단백질 아미노 황산염 알코올 에스테르 폴리아크릴레이드	기포기의 압축공기로 미리 발포시킨 기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 방법으로 기포의 양을 조절하기가 쉽고 현장발포가 용이한 것이 장점
후기포 방식	금속분말 (Al, Zn 등)	ALC와 같이 시멘트 슬러리 내에 처음부터 알루미늄 분말이나 아연분말 등 발포제를 혼합하여 적정온도에서 화학반응에 의해 가스가 발생되며, 이 가스에 부피팽창을 시키는 방법
혼합기포 방식	계면활성제(AE제)	계면활성제(AE제)등을 슬러리 중에 첨가하여 혼합과정에서 발포시키는 방법

공시체는 Fig. 3.4와 같이 시멘트와 모래 등의 원료토사와 물을 핸드믹서를 사용하여 혼합한 슬러리와 물로 희석된 기포제를 기포발생장치를 통해 기포를 발생 시킨 후 시멘트 슬러리와 다시 혼합하는 과정으로 제작한다. 발생한 기포는 경량기포토의 강도에 매우 큰 영향을 주므로 기포제에 따라 적절한 압력으로 발포한 후 단위중량을 확인하여야 한다. 본 시험에 사용된 동물성 기포제는 400~450kPa의 압력으로 발포하였고 기포군의 단위중량은 $0.5 \pm 0.05 \text{ kN/m}^3$ 으로 공시체를 제작하였다.



(a) mixing cement slurry



(b) shooting foaming agent



(c) mixing foam and cement slurry



(d) completion

Fig. 3.4 Making process of lightweight air-trapped soil

3.4 진동시험

경량기포토에 대한 진동시험기준이 없는 관계로 본 연구에서는 건설현장 및 실제 도로의 차량에 의한 진동이 경량기포토의 양생에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 양생초기 콘크리트의 기준에서 정해진 허용진동기준을 고려한 진동속도범위에서 시험을 실시하였다. 즉, 진동이 양생중인 경량기포토에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실험변수를 진동속도(vibration velocity), 진동가력시점(time when vibrated), 배합비(mixing ratio) 등으로 나누어 경량기포토의 일축압축강도를 측정하였다.

3.4.1 실험변수

(1) 진동속도(Vibration velocity)

송혜금(1998)의 연구에서는 현장에서 발생하는 진동을 재현하기 위해 일반적으로 사용되고 있는 진동규정 중에서 양생초기 콘크리트의 기준인 0.25cm/s를 최소진동속도로 하였고, 0.50cm/s, 2.50cm/s 그리고 최대 4.20cm/s까지 변화시키며 진동속도(vibration velocity)에 따른 변화를 측정하였다.

본 연구에서는 기존연구에 대한 진동속도를 기준으로 진동속도를 재설정하였다. 내부에 기포를 많이 함유하고 있는 경량기포토는 진동에 대한 영향이 더 클 것으로 예상된다. 따라서 2.50cm/s와 4.20cm/s의 큰 세기의 진동속도는 다소 하향시켜 진동속도를 설정하였다. 반복되는 예비시험을 통해 설정된 진동속도는 0.26cm/s, 0.42cm/s, 2.01cm/s 그리고 3.33cm/s이다. 설정된 진동속도에 관한 내용은 “4.1 Blastmate III”에서 다룬다.

(2) 진동가력시점(Time when vibrated)

본 시험에서는 진동가력시점(time when vibrated)을 달리하여 경량기포토의 고화에 따른 영향을 분석하였다. 각각의 진동가력시점은 공시체 제작 직후 그리고 1시간, 2시간, 4시간, 6시간, 12시간 후로 각각 30분씩 진동을 가하였다. 또한 진동을 가한 공시체에 대하여 비교분석을 위해 진동을 가하지 않는 기준공시체를 제작하였다.

(3) 배합비(Mixing ratio)

단위중량-시멘트-모래의 비율을 6-1-0, 8-1-1, 10-1-2등 세가지 배합비(mixing ratio)로 공시체를 제작하였다. 진동이 경량기포토의 양생에 미치는 영향 및 그에 대한 역학적 특성 및 강도발현을 파악하기 위하여, 이전 연구를 통해 도출된 3가지 배합에 대하여 시험을 실시하였다.

3.4.2 진동측정장치

본 실험을 진행하기에 앞서 발파소음진동측정기인 BLASTMATE III를 이용하여 해당하는 진동속도를 진동장치로부터 찾았고, 주파수는 10~30Hz의 저주파수의 범위를 사용하였다. 발파소음진동측정기의 본 기계와 센서장치는 Fig. 3.5와 같다.

BLASTMATE III는 현장에서 발생하는 발파 진동 및 소음을 정밀하게 측정하여 인근구조물의 손상에 대비하여 그 결과에 따라서 진동 및 소음의 감축여부를 판단할 수

있다. 측정장치의 사양은 Table 3.9와 같다.

Table 3.9 Specification of Blastmate III

	내 용
분해능	0.005 in/s(0.127mm/s) to 0.000625 in/s (0.0159mm/s)
진동측정범위	10 inch/sec(245mm/s)
소음측정범위	50 to 110dB in steps of 0.1 dB
Sampling Rate	Standard 124 samples per second per channel to 16,284
Event Storage	Full Waveform events(300 standard at standard samples rates of 1024)
주파수 반응	2 to 300Hz



(a) Vibration measurement equipment



(b) vibration sensor

Fig. 3.5 Vibration measurement equipment and vibration sensor

3.4.3 진동장치

본 연구에서는 도로 현장의 차량진동을 재현하기 위하여 크기 60cm × 120cm의 철판에 Fig. 3.6(a)와 같은 모터를 고정시켜 진동을 가하였다. 모터는 분당 회전수를 변화시켜 0~10까지 임의의 속도를 조절할 수 있다. 모터의 회전수뿐만 아니라 모터에서 이격된 거리를 통해 해당되는 진동속도를 측정하였다. 이렇게 모터의 회전수와 모터로부터의 이격거리 등 두 가지 변수를 가지고 0.26cm/s, 0.42cm/s, 2.01cm/s, 3.33cm/s의 진동속도를 찾았다.

3.4.5 일축압축시험

각 배합비 별로 제작된 공시체에 대하여 계획된 진동속도로 진동을 가한 후 14일과 28일동안 습윤양생을 거쳐 일축압축시험을 실시하였다. 본 연구에서는 배합조건에 따른 경량기포토의 응력-변형 특성과 단위중량과 일축압축강도와와의 관계를 조사하기 위해 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축시험은 측압이 없는 상태에서 상하로 축하중을 주어 시료를 전단파괴시키는 방법으로 삼축압축시험에서 구속압력이 0인 경우의 시험에 해당한다. 시험 방법은 KS F 2314에 따라 Fig. 3.7과 같은 일축압축시험기를 이용하여 실시하였고, 내경 5cm, 길이 10cm로 제작된 공시체를 제작하여 사용하였다.



Fig. 3.7 Equipment of unconfined compression test

공시체의 일축압축강도와 변형계수 E_{50} 은 식 (3.1)을 이용하여 계산하였다.

$$q_u = \frac{P}{A} \times \left(1 - \frac{\epsilon_c}{100} \right), \quad (3.1)$$

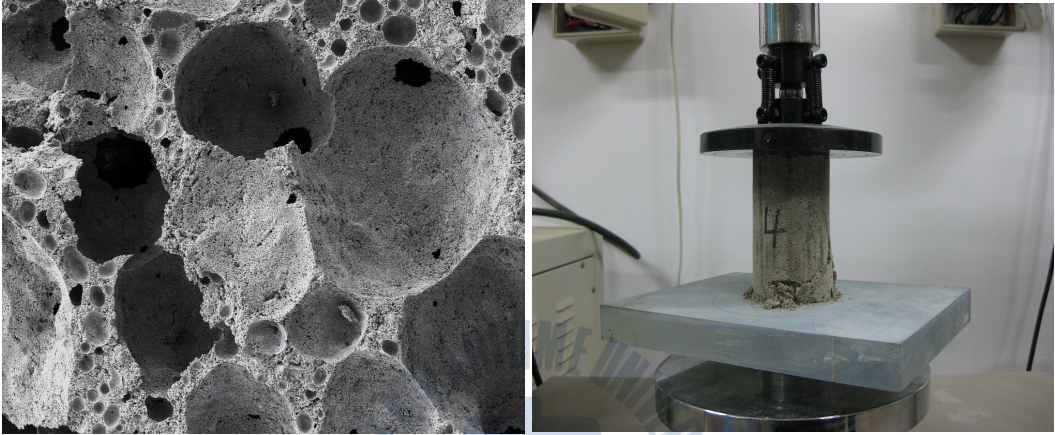
여기서, q_u : 일축압축응력(kPa, $1\text{kgf/cm}^2=98.0665\text{kPa}$)

P : 압축변형이 ε_c 일 때 공시체에 가해진 압축력(kN)

A_0 : 압축하기 전의 단면적(m^2)

ε_c : 공시체의 압축변형(%)

D_0 : 압축하기 전의 공시체의 지름(m)



(a) Magnified picture

(b) failure shape

Fig. 3.8 Magnified picture and failure shape of specimen (8-1-0)

진동에 따른 강도의 변화를 알아보기 위해 진동을 전혀 가하지 않은 공시체의 일축 압축강도와 진동이 가해진 시험 공시체의 일축압축강도를 비교하였다. 경량기포토 공시체는 양생 14일과 28일 강도를 측정하였고 측정결과는 진동을 가하지 않은 기준 공시체에 대한 시험 공시체의 강도감소율 또는 강도증가율과 일축압축시험결과를 그대로 그래프에 도시하는 두 가지 방법으로 나타내었다. 강도감소(증가)율의 산정식은 다음과 같다.

$$\text{강도감소(증가)율(\%)} = \frac{q_{u(T)} - q_{u(S)}}{q_{u(S)}} \times 100, \quad \begin{array}{l} q_{u(T)} : \text{시험공시체의 일축압축강도} \\ q_{u(S)} : \text{기준공시체의 일축압축강도} \end{array}$$

제 4 장 결과 및 분석

단위중량 6-1-0, 8-1-1, 10-1-2 등으로 제작된 경량기포토 공시체에 대하여 각각의 진동속도 및 진동가력시점으로 30분씩 진동을 가하였다. 본 장에서는 Blastmate III의 측정결과, 진동후의 공시체 외형변화 및 강도변화를 고찰해 보았다.

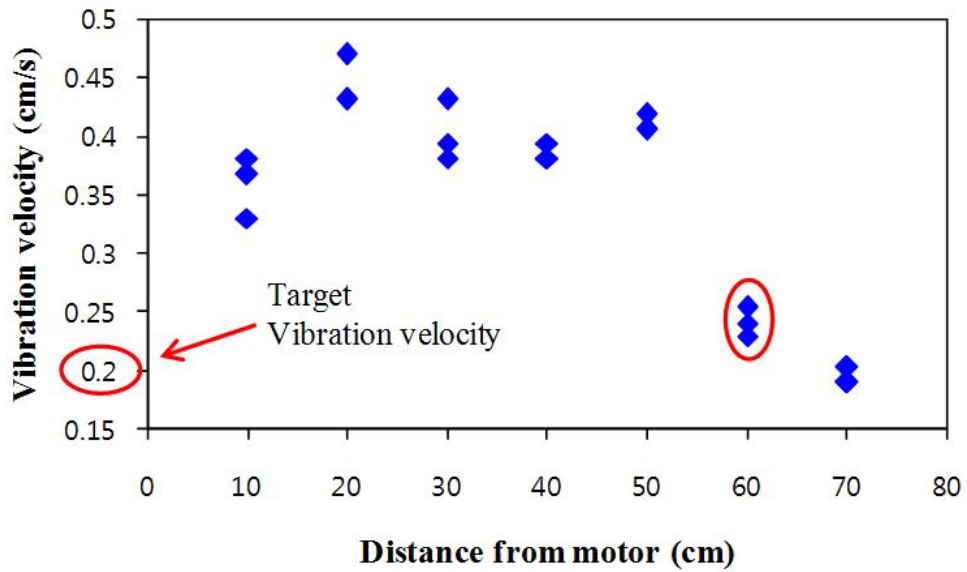
4.1 Blastmate III의 측정결과

본 연구에서는 현장에서 발생하는 진동을 재현하기 위하여 진동측정장치인 Blastmate III를 이용하였다. 기존의 연구결과와 콘크리트에 대한 최소진동규정에 따라 0.2cm/s, 0.5cm/s, 2.0cm/s 그리고 3.0cm/s의 진동속도를 계획하였다(Table 4.1). 이를 기준으로 모터의 진동속도와 모터로부터의 이격거리 등의 두 가지 변수를 이용하여 진동장치로부터 해당하는 진동속도를 찾을 수 있었다.

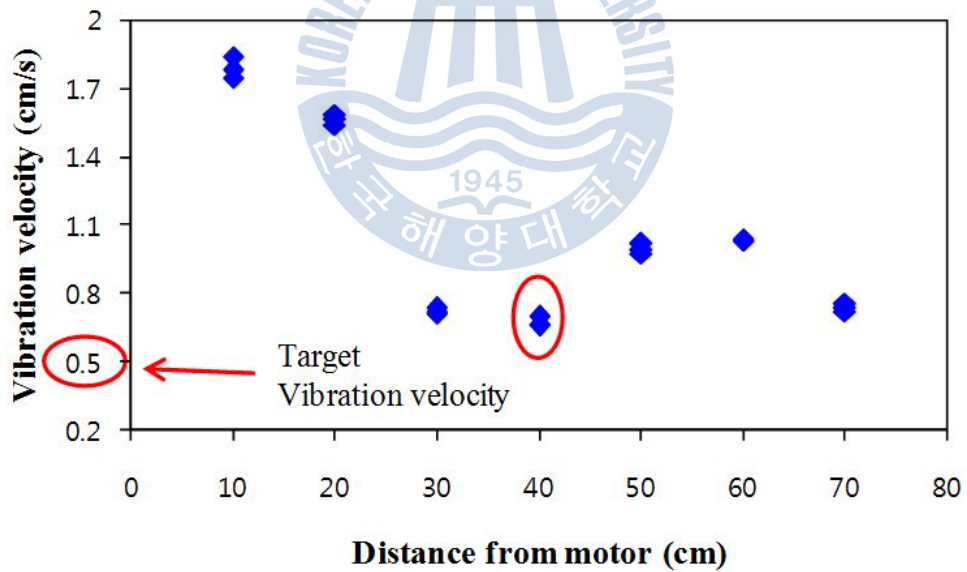
Fig. 4.1은 모터의 회전속도에 따른 이격거리 및 진동속도를 나타낸 그래프이다. 초기 시험 진동을 실시하여 모든 경우에 대하여 각각 3회씩 진동을 주어 측정하였다. 측정결과, 0 ~ 10까지 조절할 수 있는 모터의 회전속도와 0 ~ 80cm까지의 이격거리 등으로 0.2cm/s는 <모터의 회전속도 3.5>, <이격거리 60cm>에서, 0.5cm/s는 <모터의 회전속도 4.0>, <이격거리 40cm>에서, 2.0cm/s는 <모터의 회전속도 5.0>, <이격거리 40cm>에서, 3.0cm/s는 <모터의 회전속도 6.0>, <이격거리 70cm>에서 해당하는 진동속도를 찾을 수 있었다. 차후에 필요로 하는 진동속도는 Fig. 4.1의 그래프를 통하여 찾을 수 있을 거라 판단된다.

Table 4.1 Vibration regulation of several organization

분 류	12H	24H	36H	2일	3일	4일	5일	7일	10일
국내 (주택공사)	無	0.63	2.54		5.08				
미국교통국	0.63		2.54		5.08			12.7	25.4
Hulshizer	3.81	5.08	10.16		17.78				
미국 토목학회	0.25	1.27	1.27~5.08					5.08	
독일	0.25	1.27	2.54		6.35			10.2	

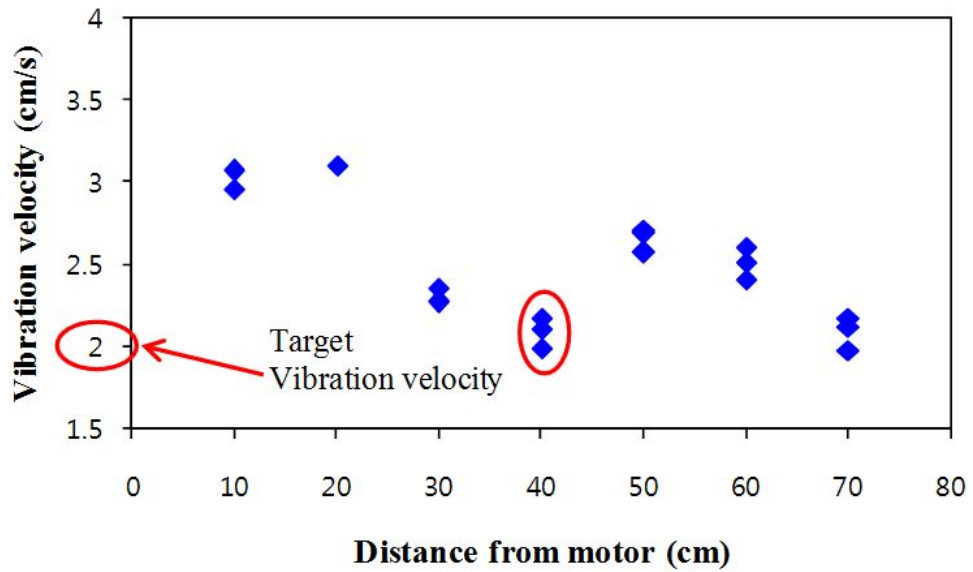


(a) Revolutions per minute (RPM) 3.5

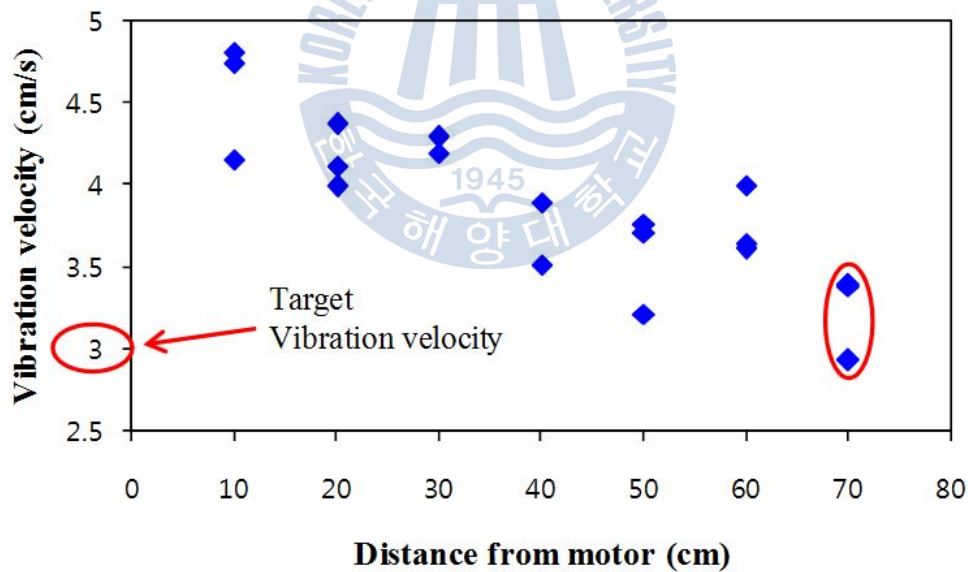


(b) Revolutions per minute (RPM) 4.0

Fig. 4.1 Vibration velocity and distance from motor according to RPM (continued)



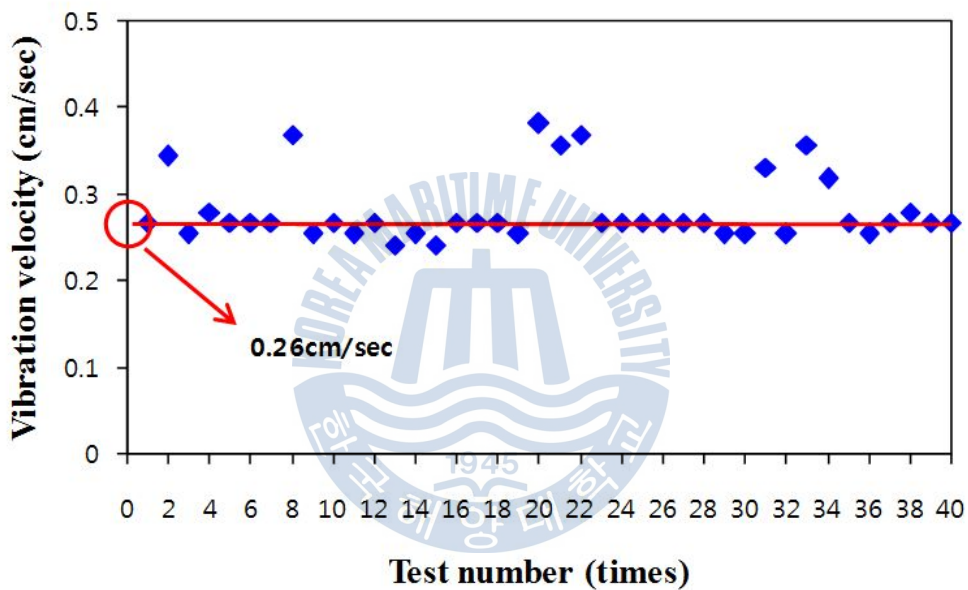
(c) Revolutions per minute (RPM) 5.0



(d) Revolutions per minute (RPM) 6.0

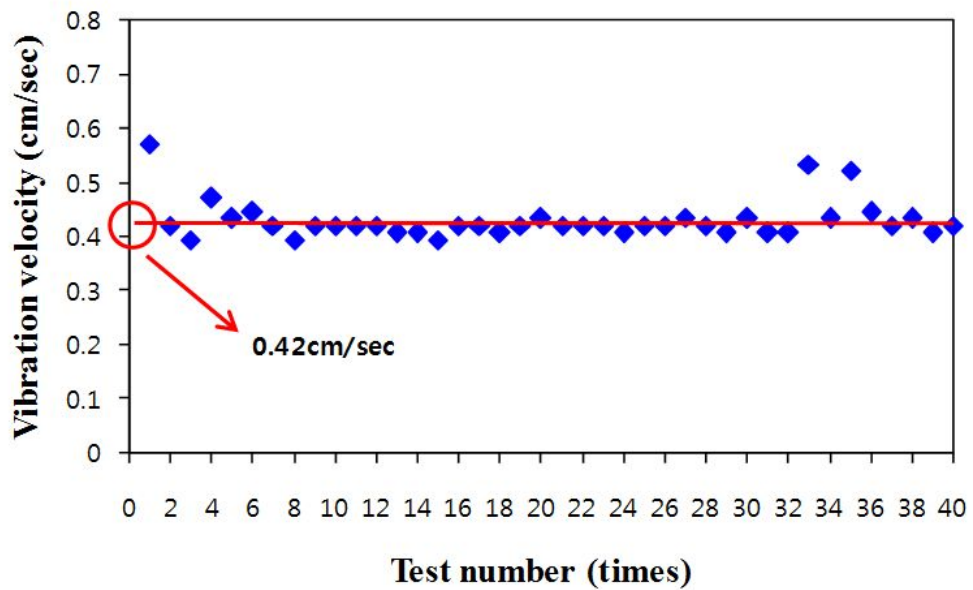
Fig. 4.1 Vibration velocity and distance from motor according to RPM

초기 시험 진동을 통하여 측정된 값에 대한 검증 및 신뢰도를 높이기 위해 해당하는 진동에 대하여 40회씩 진동을 가하였고 그에 대한 값을 측정 한 후 그래프로 나타내었다(Fig. 4.2). 다수의 진동시험 측정결과, 약간의 튀는 값들이 측정되었지만 해당하는 진동속도로 간주하기에는 무리가 없으므로 신뢰성을 확보하기 위한 결과로 판단할 수 있다고 사료된다. Fig. 4.2를 통하여 계획하였던 진동속도는 0.2cm/s는 0.26cm/s로, 0.5cm/s는 0.42cm/s로, 2.0cm/s는 2.01cm/s로, 3.0cm/s는 3.33cm/s로 재설정하였다. 진동속도의 변경전과 후의 차이는 미미하지만 본 연구에서는 재설정된 진동속도를 기준으로 표기하였고, 그에 대한 값으로 시험을 진행하였다.

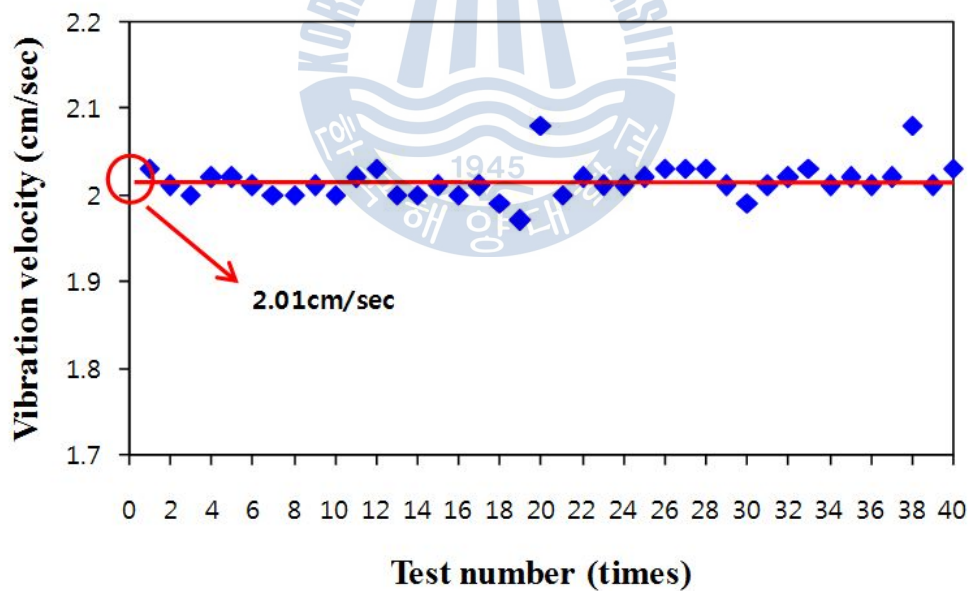


(a) Vibration velocity 0.26cm/sec

Fig. 4.2 Distribution according to the test number (continued)

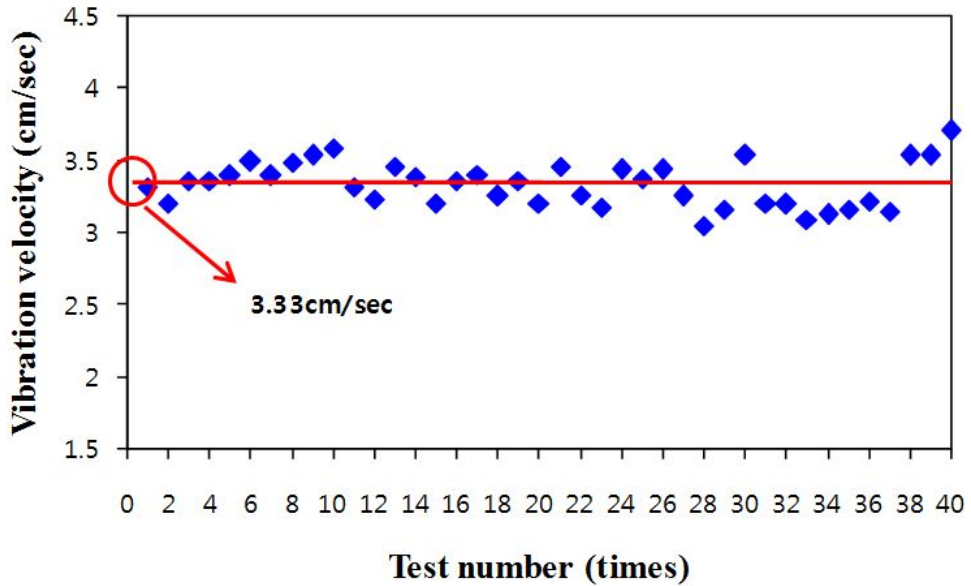


(b) Vibration velocity 0.42cm/sec



(c) Vibration velocity 2.01cm/sec

Fig. 4.2 Distribution according to the test number (continued)



(d) Vibration velocity 3.33cm/sec

Fig. 4.2 Distribution according to the test number

진동속도와 모터로부터 이격거리와의 관계를 모터의 회전속도별로 나타낸 Fig. 4.1에서 각 그래프는 감소→증가→감소의 형태가 반복적으로 나타나면서 모터의 회전속도가 증가함에 따라 일정한 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 한 개의 직선으로 나타내기에는 시험횟수 및 분산이 적절하지 않지만, 간편식으로 나타내면 모터의 회전속도가 증가할수록 전체적인 경향을 나타내는 그래프의 기울기와 축 절편 또한 증가하는 경향을 알 수 있다(Table 4.2).

Table 4.3은 각 진동속도에 해당하는 모터의 회전속도와 모터로부터 이격거리를 정리한 것이다.

Table 4.2 Relations according to the RPM

모터의 회전속도	관계식
2.5	$y = -0.0007x + 0.1113$
3.0	$y = -0.0025x + 0.3287$
3.5	$y = -0.0035x + 0.4880$
4.0	$y = -0.0137x + 1.6034$
5.0	$y = -0.0151x + 3.1057$
6.0	$y = -0.0254x + 4.9343$

Table 4.3 RPM and distance of motor proposed from vibration velocity

진동속도 (cm/s)	모터의 회전속도	모터로부터 이격거리(cm)
0.26	3.5	60
0.42	4.0	40
2.01	5.0	40
3.33	6.0	70

4.2 공시체의 외형변화

Fig. 4.3는 진동속도 및 진동가력시점에 따른 공시체의 외형변화 사진이다. Fig. 4.3(a)는 진동을 가하지 않은 공시체로써 외부표면이 상당히 매끈하고 균질한 것을 알 수 있다. 공시체에 중간크기의 진동, 혹은 약간 굳은 슬러리상태에서 진동을 가하였을 때는 Fig. 4.3(b)처럼 외부표면에 흰색의 물결무늬 자국이 생기고 상당한 강도저하가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 큰 크기의 진동 혹은 거의 굳지 않은 슬러리상태에서 진동을 가하였을 때는 Fig. 4.3(c)와 같이 커다란 균열이나 크랙, 소포의 흔적이 보이며 하부층과 중상부층에 재료분리현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 진동이 가해졌을 때 중상층의 기포는 소포되어 외부로 방출되지만 하부층의 기포는 외부로 빠져나가지 못했기 때문으로 판단된다.



(a) No vibration specimen



(b) Moderate vibration (2.01cm/s)
at T2, T4



(c) High vibration (3.33cm/s)
at T0, T1



(d) Separated phenomenon of specimen

Fig. 4.3 Shape variation of specimen according to the vibration and slurry condition

4.3 단위중량(배합비)

진동시험에 대한 결과로서, Fig 4.4와 Fig. 4.5는 진동의 영향으로 인한 압축강도의 감소율 또는 증가율로 나타낸 그래프이고 Fig. 4.6과 Fig. 4.7에서는 압축강도 값을 그대로 그래프에 도시하였다.

본 연구에서는 실험변수 중 하나로 배합비를 설정하여 6-1-0, 8-1-1, 10-1-2 총 3가지 배합비로 공시체를 제작하여 진동을 가한 후 실험결과를 분석해 보았다. 진동으로 인하여 경량기포토에 미치는 영향인자는 시멘트-모래비, 모래함유여부 및 기포량 등을 꼽을 수 있다. 기본적으로 3가지 배합에 대하여 같은 진동을 가하였을 때, 기포량이 많고 단위중량이 작은 배합이 진동의 영향이 많을 것으로 실험초기에 예상하였지만, 이와는 반대로 기포량은 적지만 모래의 함유량이 많은 10-1-2배합이 진동의 영향으로 압축강도의 감소율이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 슬러리 상태인 경량기포토에 진동을 가하였을 때, 영향을 미치는 인자 중 내부의 기포에 미치는 영향보다는 경량기포토의 골격역할을 하는 모래의 영향이 더 크다고 판단할 수 있다.

이로써, 배합비 중에서 가장 두드러지는 영향인자는 모래인 것으로 판단된다. 모래를 포함하지 않은 배합의 공시체(6-1-0)에서 약한 진동에서는 거의 강도의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 반면 모래를 포함하는 배합의 공시체(8-1-1)에서 0.50cm/s이하의 약한 진동에서는 압축강도가 소폭 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 경량기포토의 골격역할을 하는 모래의 다짐효과일 것으로 판단된다. 하지만 이러한 다짐효과로 인한 강도의 상승은 0.50cm/s이하의 약한 진동속도에 제한되고, 그 이상의 진동에서는 골격의 재배열 및 소포 등의 현상으로 강도가 저하된다.

건설현장마다 주위의 진동이나 적용되는 경량기포토의 배합이 다르겠지만 위와 같은 결과를 고려하여 진동을 제한하거나 모래의 첨가여부에 따른 배합을 선택하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

경량기포토의 진동에 대한 영향 및 내부의 기포량에 비교하여, 일반적으로 수화된 콘크리트의 경우는 본래 그 조직상 모세관 공극(capillary pore)과 젤 공극(gel pore)을 가지고 있으며, 공극 크기는 0.05mm이하의 연행 공기와 타설 중에 갇힌 공기로 말미암아 큰 간극을 갖는다. 공극이 다짐에 의해 조밀해지는지 여부는 콘크리트의 강도에 지대한 영향을 미친다. 이렇듯 양생중인 콘크리트에 진동이 가해지면 공극량의 감소와 간극의 폭이 줄어 그 결과는 콘크리트에 플러스 요인으로 작용한다(김영섭, 1999).

4.4 진동속도

본 연구에서는 현장에서 발생하는 진동을 재현하기 위하여 모터가 장착된 진동장치를 제작하였고, 모터의 분당회전수(rpm)와 모터와의 이격거리로부터 0.26cm/s ~ 3.33cm/s의 진동속도를 찾을 수 있었다. Fig. 4.4와 Fig. 4.5를 통해 진동속도 0.26cm/s와 0.42cm/s의 경우에는 진동의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타난 반면 2.01cm/s 이상의 진동속도에서는 압축강도의 감소율이 현저하게 증가하는 것을 알 수 있다. 기본적으로 3가지 배합비에 대한 진동속도의 변화경향은 비슷하다.

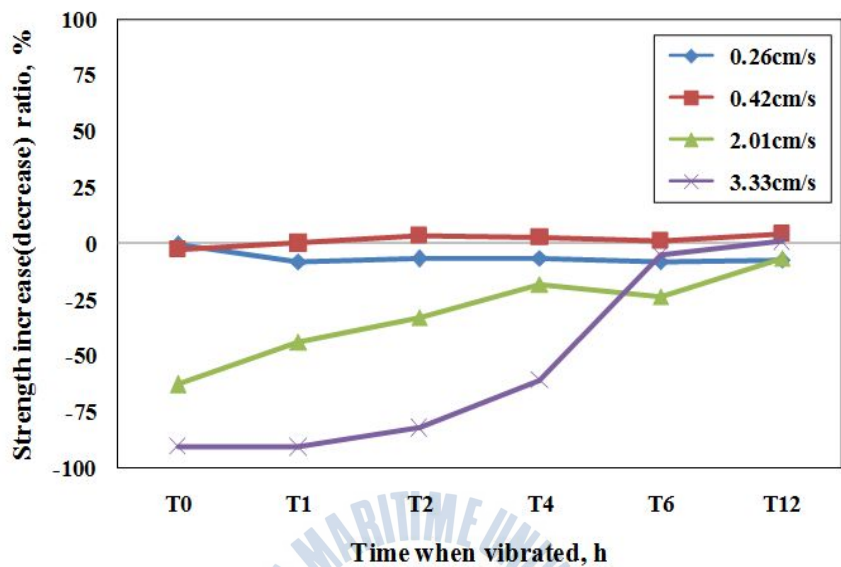
0.26cm/s와 0.42cm/s의 진동속도를 볼 때, 6kN/m³의 공시체는 거의 변화를 찾아볼 수 없고, 8kN/m³공시체는 강도가 소폭 상승된 것을 알 수 있으며, 10kN/m³공시체에서는 강도감소율을 값이 다소 불안정한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Figs. 4.4 ~ 4.7(c), (e)에서 진동속도는 2.01cm/s와 3.33cm/s이고, 진동가력시점 T0 ~ T4에 해당하는 공시체는 하부층과 중상부층이 나누어지고 그 사이에 5~10mm의 공간이 생기는 등의 재료분리현상이 나타났다. 이것은 진동이 공시체에 가해졌을 때 중상부층의 기포는 소포되어 외부로 방출되지만 하부층의 기포는 외부로 빠져나가지 못했기 때문으로 판단된다. 또한 진동으로 인해 하부층에 시멘트와 모래가 집중되어 해당하는 기준 단위중량에 비해 훨씬 무겁고 단단하며, 중상부층으로는 하부층의 기포가 집중되어 기준 단위중량에 비해 가볍고 강도도 소실된 것을 알 수 있다.

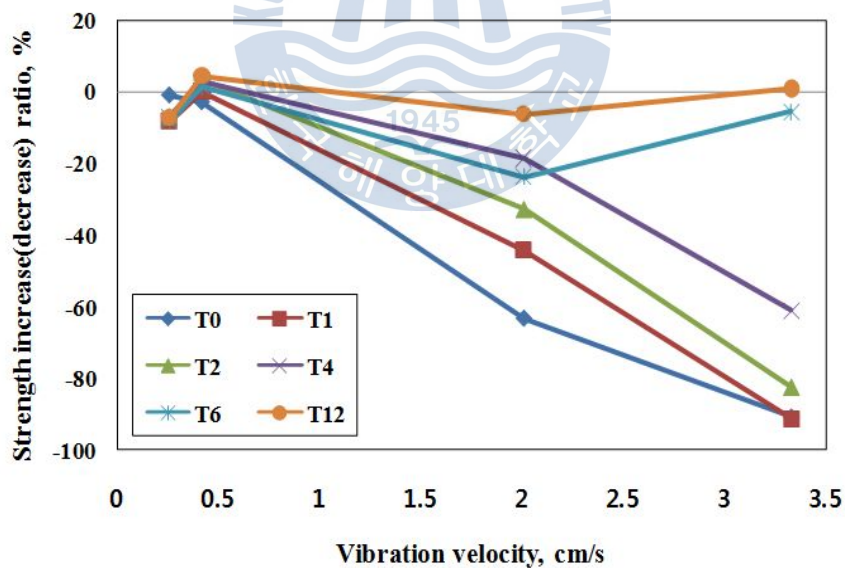
4.5 진동가력시점

경량기포토의 양생 시 진동이 가해지는 시점이 미치는 영향을 파악하기 위하여 T0, T1, T2, T4, T6, T12 등 6가지 진동가력시점을 설정하여 시험을 진행하였다. 경량기포토의 진동가력시점을 고려한 진동시험결과 세 가지 단위중량의 경우 모두 비슷한 결과를 나타내었다. 0.26cm/s와 0.42cm/s의 진동속도는 공시체가 양생될 때 고화자체의 별다른 영향을 미치지 않기 때문에 진동가력시점에 대한 영향 또한 별다른 의미가 없다고 할 수 있다. 하지만 2.01cm/s이상의 진동속도에서는 공시체 제작 직후부터 2시간까지는 고화가 제대로 이루어지지 않고 많은 양의 기포가 소포되어 강도가 발현되지 않는 것을 알 수 있다. 이로써 경량기포토는 슬러리상태에서 4시간 정도 후에 시멘트의 고화가 빠르게 시작되고 이후엔 진동의 영향을 거의 받지 않는다고 판단할 수 있다. 특이한 점으로 단위중량 10kN/m³공시체의 경우 6, 8kN/m³공시체의 경우보다 강도감소(증가)율 값이 다소 불안정한 값이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 경량기포토의 각 재료 중에서 비중이 가장 큰 모래의 영향일 것으로 판단된다. 진동을 가하였을 때 소포와는 별개로 무거운 비중의 모래가 가라앉는 현상이 두드러질 것이다. 모래

가 가라앉을 때 가라앉는 속도나 모래의 다양한 입자 형상에 따른 배열은 다를 것으로 판단되기 때문에 이로써 불안정한 강도감소를 값이 나타나는 것으로 사료된다.

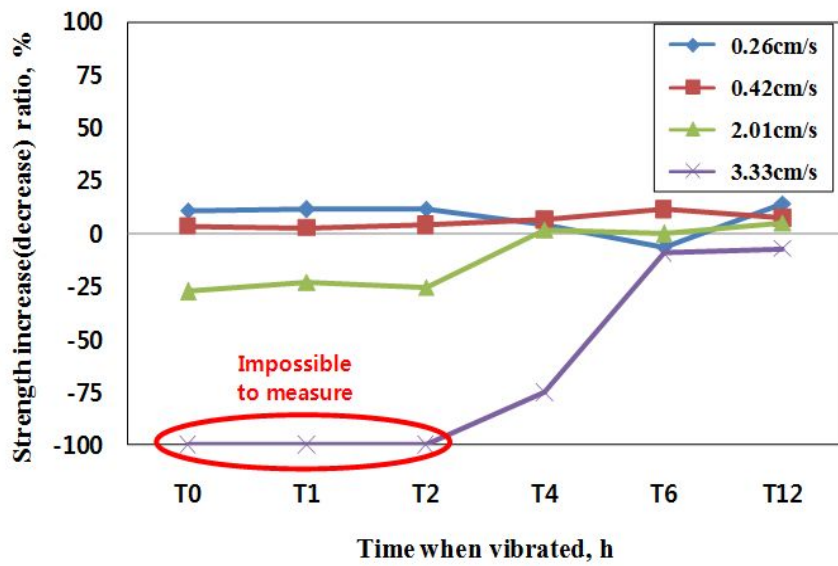


(a) Time when vibrated (unit weight 6kN/m^3)

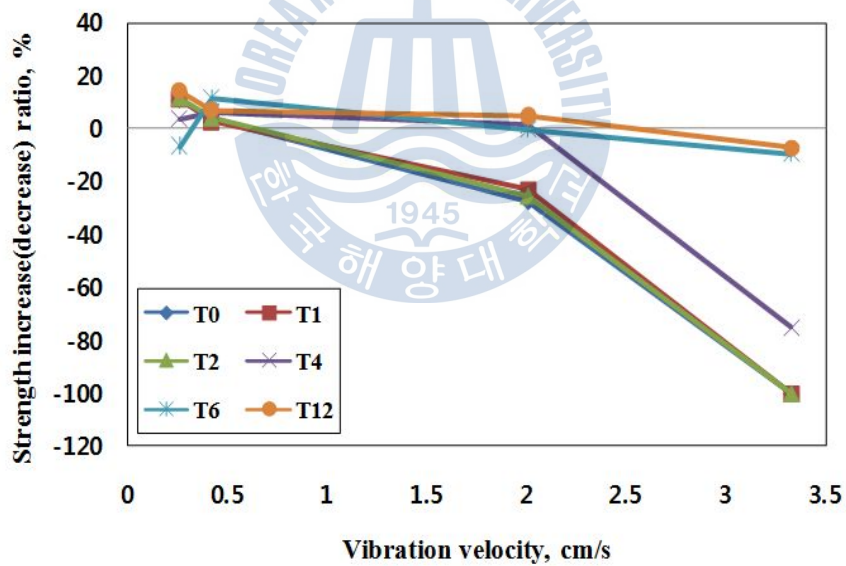


(b) Vibration velocity (unit weight 6kN/m^3)

Fig. 4.4 Relation between test variable and ratio of strength increase(decrease) (cured 14 days) (continued)

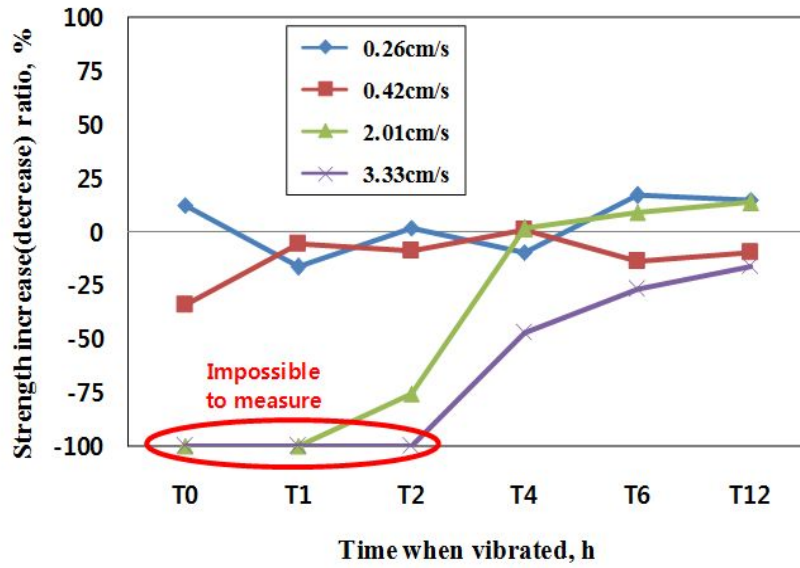


(c) Time when vibrated (unit weight 8kN/m^3)

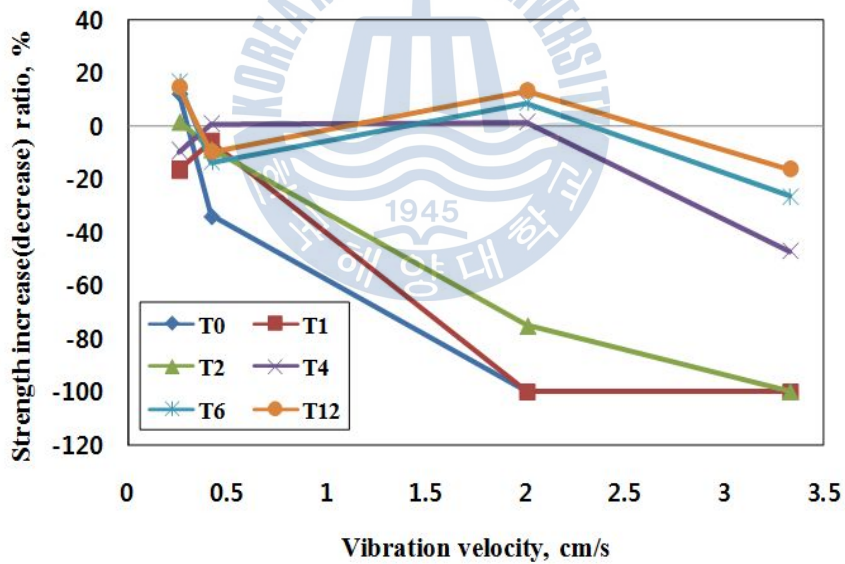


(d) Vibration velocity (unit weight 8kN/m^3)

Fig. 4.4 Relation between test variable and ratio of strength increase(decrease) (cured 14 days) (continued)

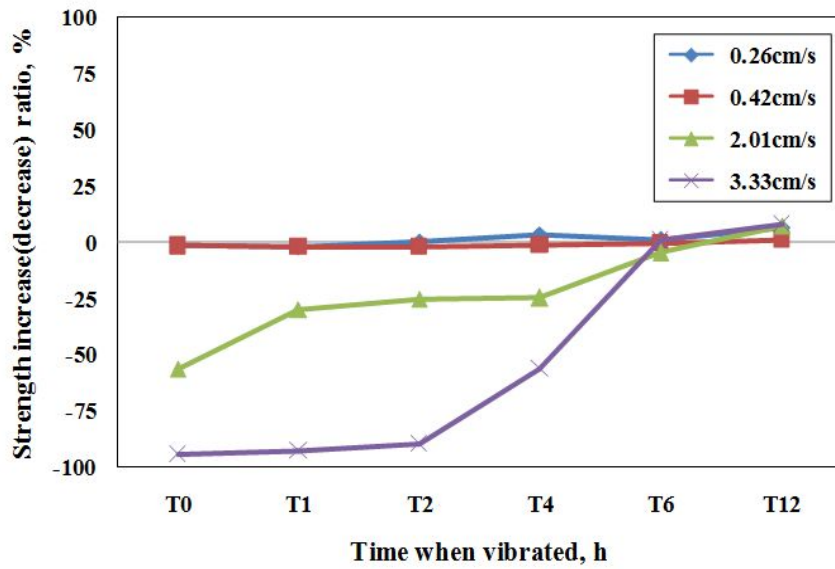


(e) Time when vibrated (unit weight 10kN/m^3)

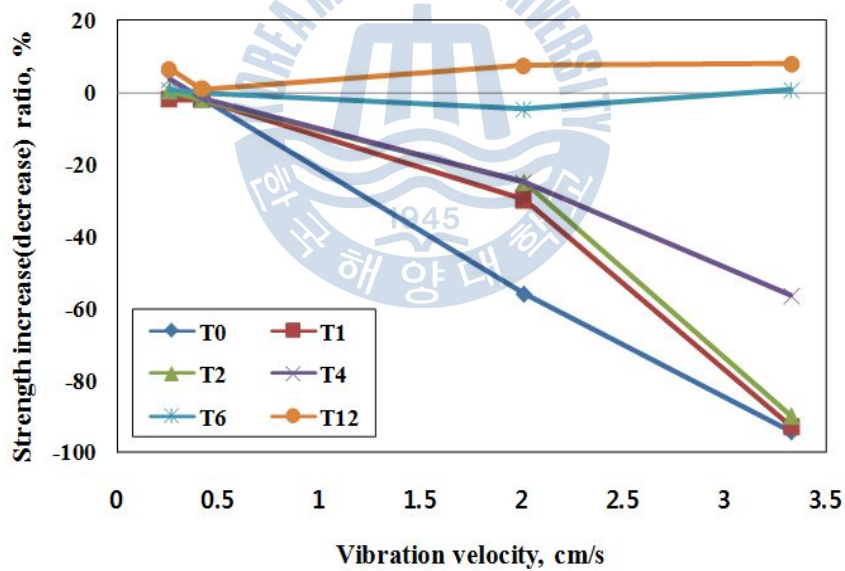


(f) Vibration velocity (unit weight 10kN/m^3)

Fig. 4.4 Relation between test variable and ratio of strength increase(decrease) (cured 14 days)

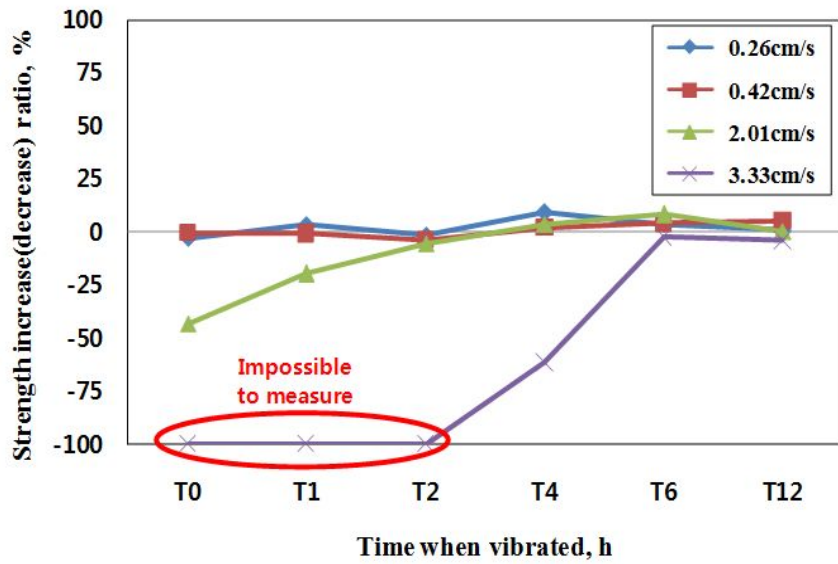


(a) Time when vibrated (unit weight 6kN/m^3)

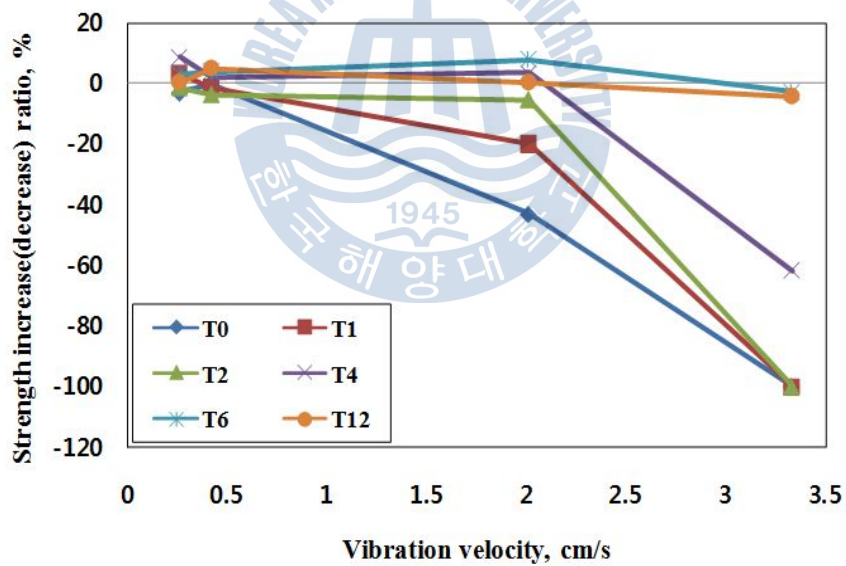


(b) Vibration velocity (unit weight 6kN/m^3)

Fig. 4.5 Relation between test variable and ratio of strength increase(decrease) (cured 28 days) (continued)

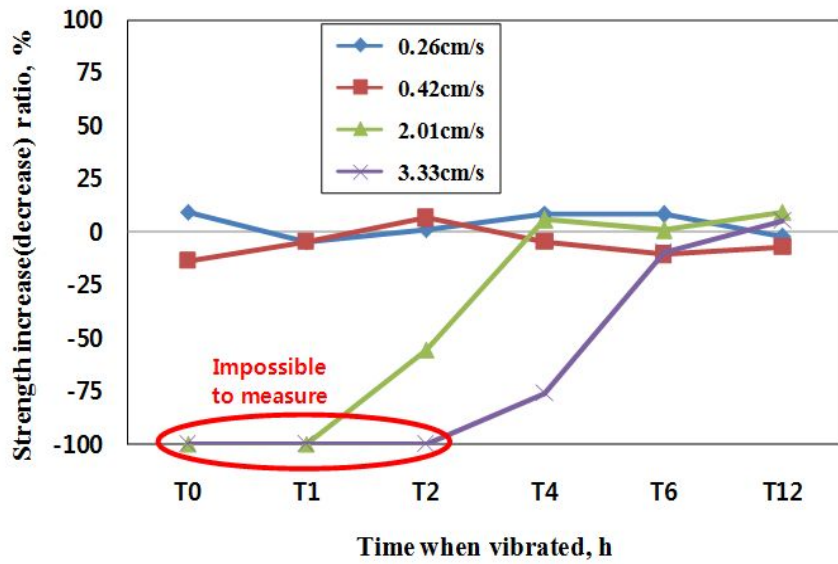


(c) Time when vibrated (unit weight 8kN/m^3)

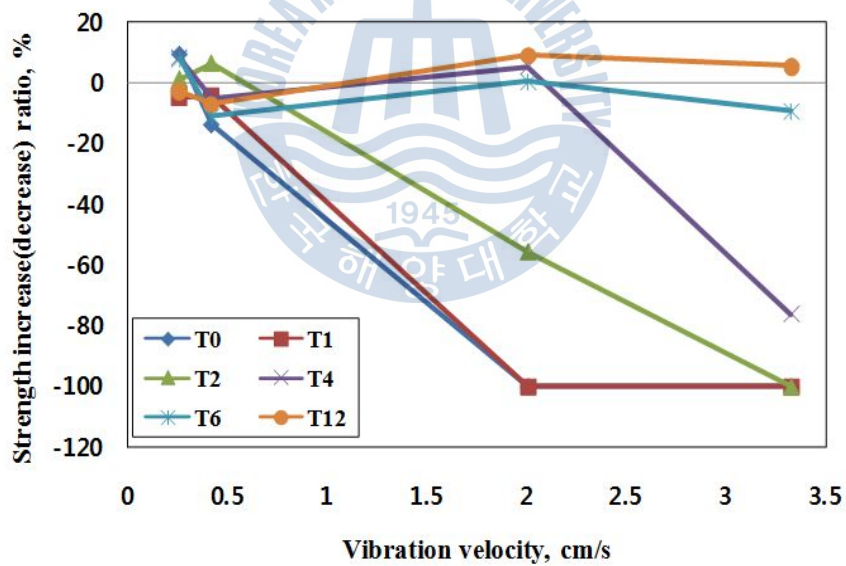


(d) Vibration velocity (unit weight 8kN/m^3)

Fig. 4.5 Relation between test variable and ratio of strength increase(decrease) (cured 28 days) (continued)



(e) Time when vibrated (unit weight 10kN/m^3)



(f) Vibration velocity (unit weight 10kN/m^3)

Fig. 4.5 Relation between test variable and ratio of strength increase(decrease) (cured 28 days)

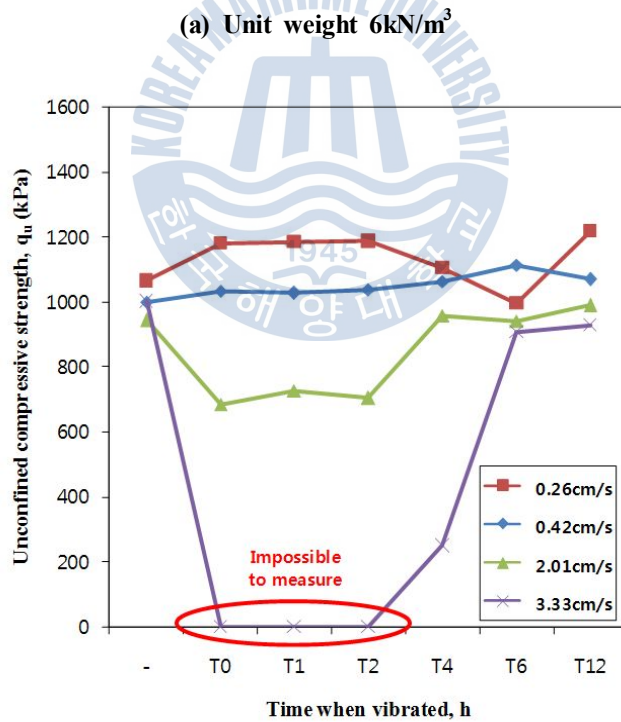
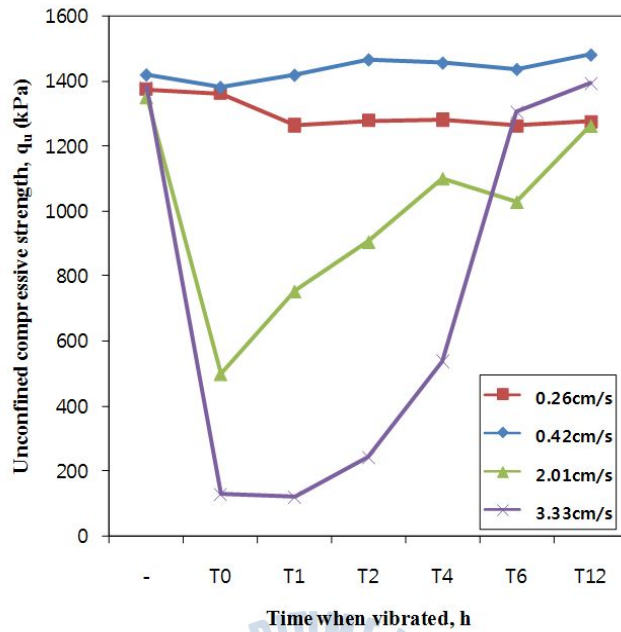
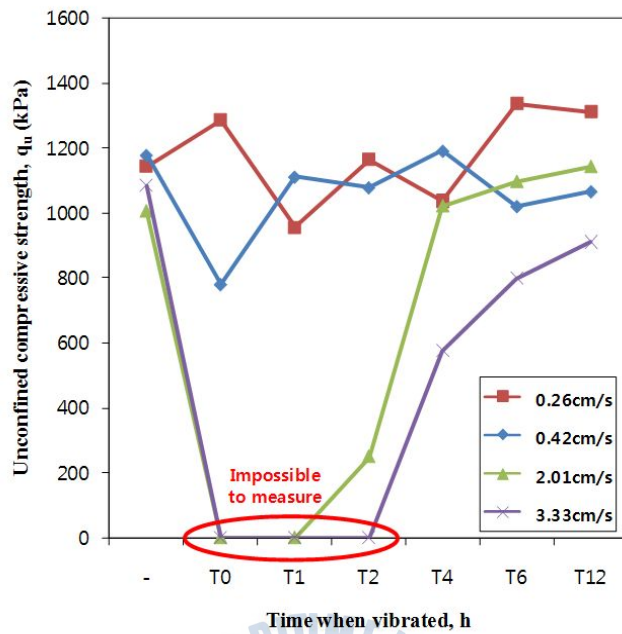


Fig. 4.6 Relation between time when vibrated and unconfined compressive strength (cured 14 days) (continued)



(c) Unit weight 10kN/m^3

Fig. 4.6 Relation between time when vibrated and unconfined compressive strength (cured 14 days)

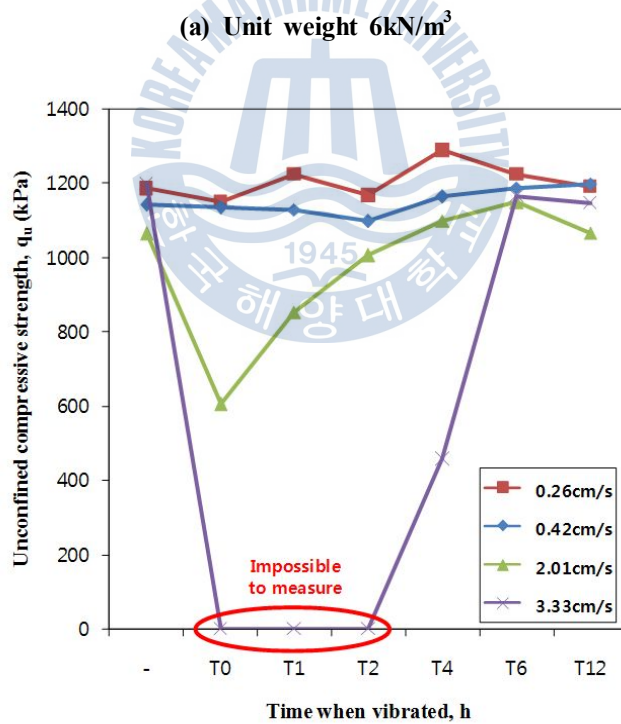
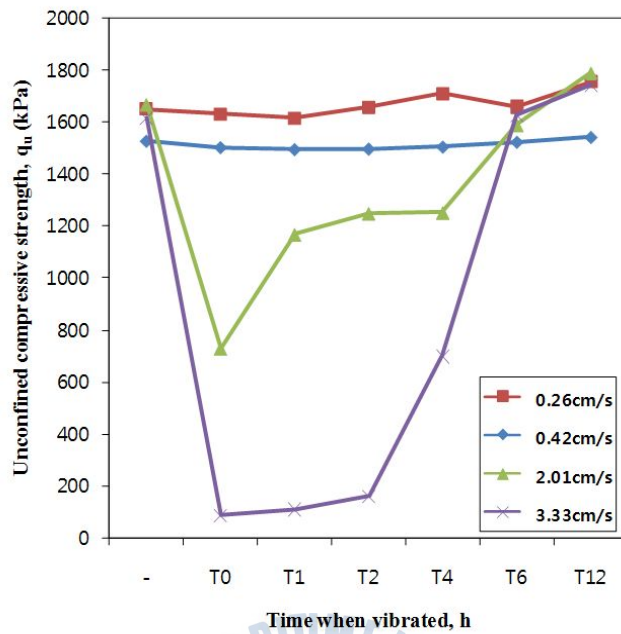
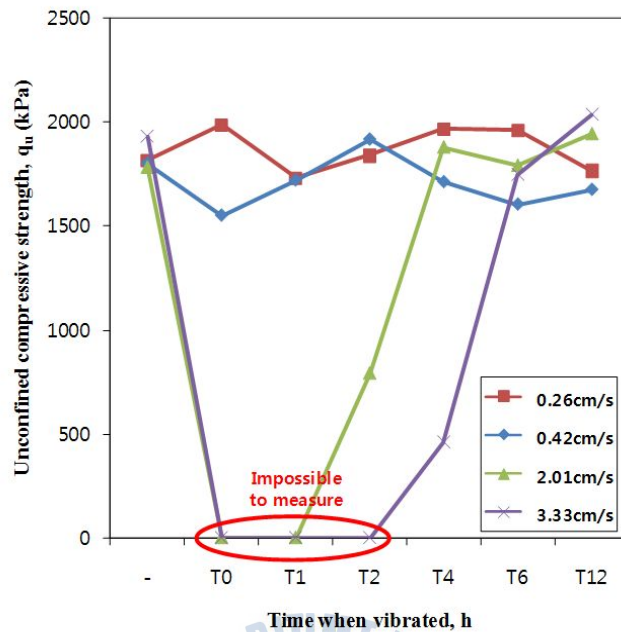


Fig. 4.7 Relation between time when vibrated and unconfined compressive strength (cured 28 days) (continued)



(c) Unit weight 10kN/m^3

Fig. 4.7 Relation between time when vibrated and unconfined compressive strength (cured 28 days)

4.6 현장 적용성

진동이 양생중인 경량기포토에 강도특성에 미치는 영향에 대하여 4.2 ~ 4.5절을 통해 분석해 보았다. 공시체에 기준 이상의 진동속도를 주거나 진동가력시점 이내에서 진동을 가하였을 경우 급격한 강도 저하 및 재료분리현상, 소포현상 등으로 경량기포토에 치명적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 본 절에서는 경량기포토의 진동의 영향에 따른 위험성을 정량적인 수치로 표현하여 진동에 대한 기준을 만들고자 한다. 시험 결과 중에서 거의 영향을 미치지 않는 0.26cm/s, 0.42cm/s의 낮은 진동속도와 T6, T12의 상당히 굳은 슬러리 상태의 시험 case는 배제시키고 양생 28일 압축강도에 대하여 적용하고 분석하였다. 또한 압축강도에 대하여 강도감소율 25%를 기준으로 이에 대한 진동속도 및 진동가력시점에 대한 기준수치를 정하였다.

진동가력시점을 고려하였을 때, Figs. 8~10(a)를 통해 3가지 배합의 경우 비슷한 결과가 나타나는 것을 알 수 있다. T5이내에는, 즉 경량기포토가 현장에 타설된 후 5시간 이내에는 주위에 건설기계 및 발파 등의 진동이 있을 경우 압축강도의 감소율이 30%이상 나타나기 때문에 타설 시 주어진 시간 내에는 주위 진동에 대한 제한이 필요할 것으로 판단된다.

진동속도를 고려하였을 때, Figs. 8~10(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 6kN/m³과 8kN/m³의 경우 1.2cm/s의 진동속도를, 10kN/m³의 경우 0.6cm/s의 진동속도를 진동 제한치로 규정할 필요성이 있다고 판단된다.

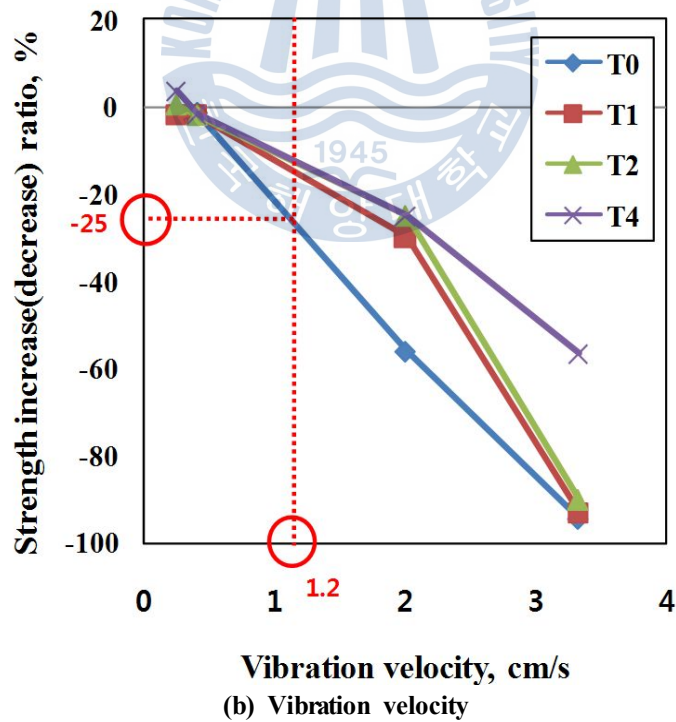
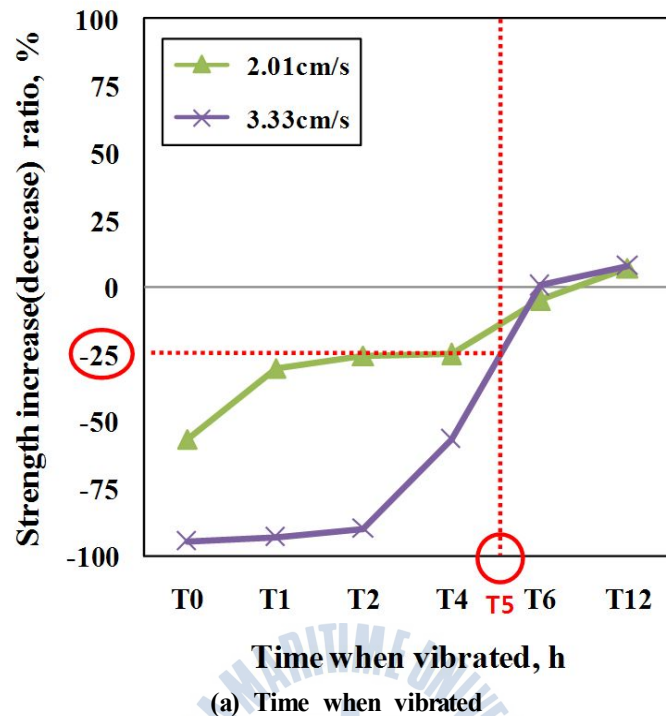


Fig. 4.8 Regulation of lightweight air-trapped soil about unit weight 6kN/m^3

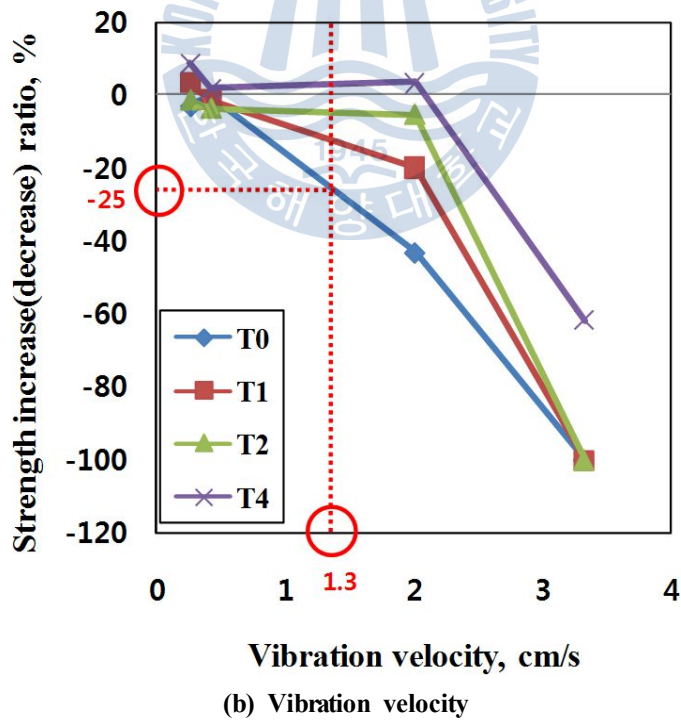
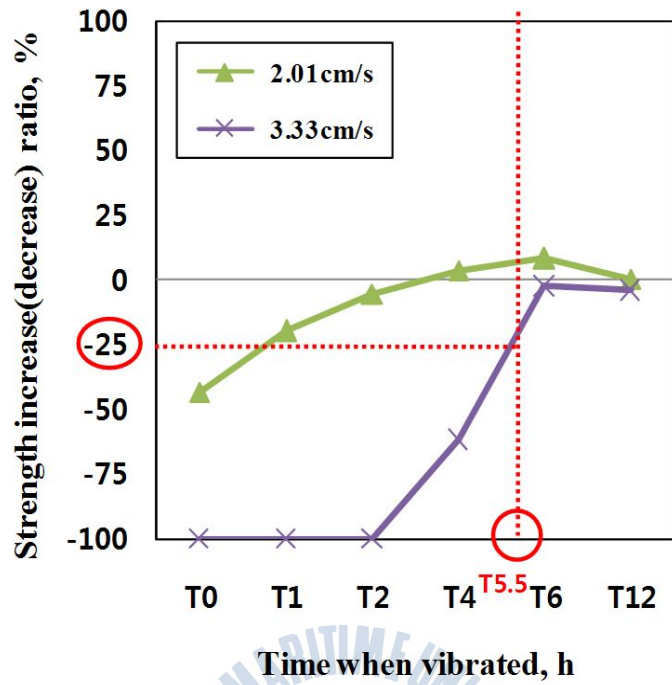


Fig. 4.9 Regulation of lightweight air-trapped soil about unit weight 8kN/m^3

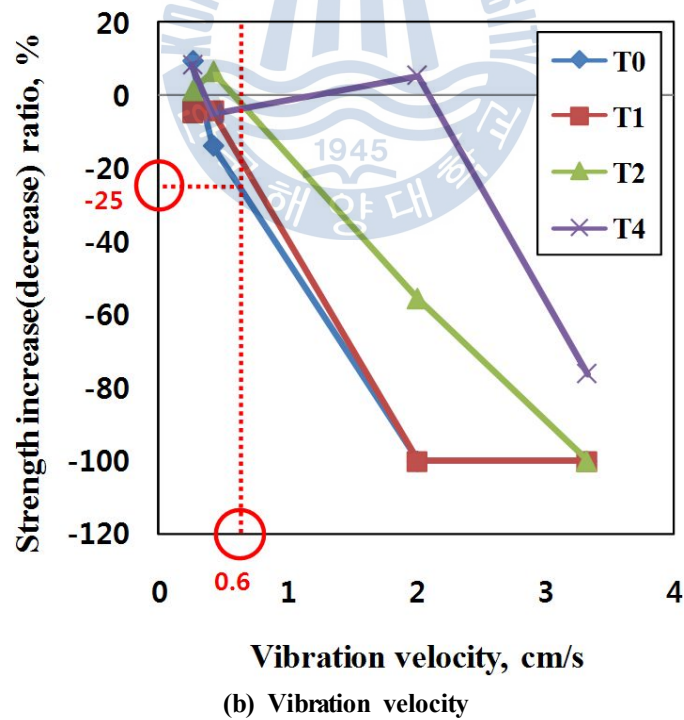
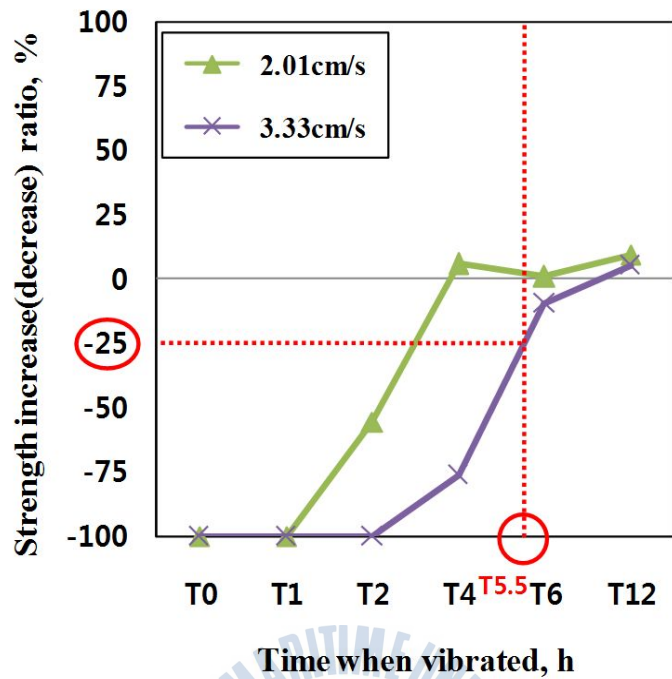
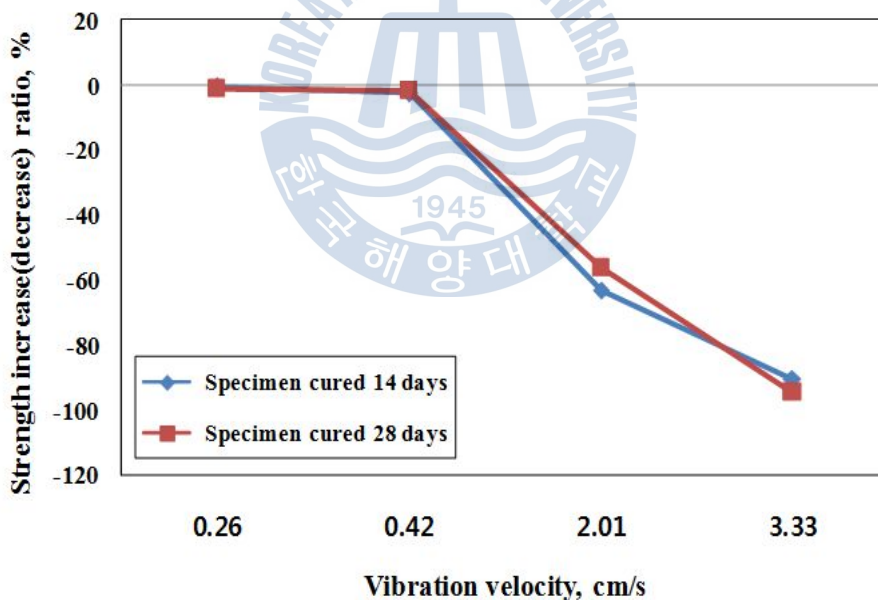


Fig. 4.10 Regulation of lightweight air-trapped soil about unit weight 10kN/m^3

4.7 양생일수

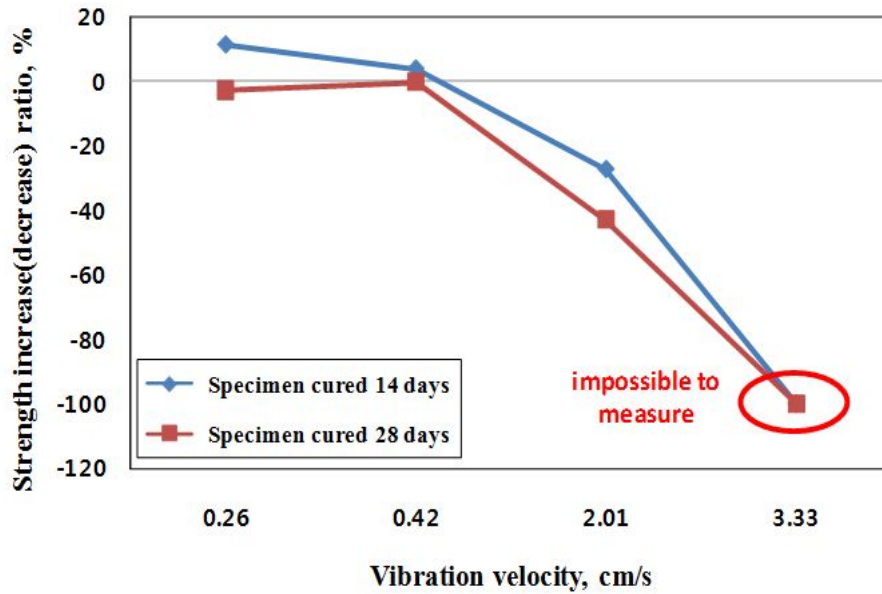
본 연구에서는 진동시험 결과에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 양생 14일 공시체와 28일 공시체에 대하여 일축압축시험을 실시하였다. Fig. 4.11은 각 양생별 공시체의 강도감소율을 비교한 그래프이다. 14일 공시체의 일축압축강도는 28일 공시체의 80% 정도로 나타났으며, 양생일수에 따른 강도의 차이는 있지만 14일과 28일의 대부분 경우에서 비슷한 경향을 나타내었다.

14일 공시체와 28일 공시체의 강도감소율에 대한 정확한 비교를 위하여 T0에 대하여 다시 한 번 비교하여 분석해 보았다. T0 공시체는 시멘트슬러리와 발포되어진 기포를 혼합한 직후 바로 진동을 가하여 강도변화가 가장 크다고 할 수 있다. 각각의 경우에 대하여 강도의 변화는 가장 크지만 양생일수에 따른 변화양상은 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 단위중량 8, 10kN/m³공시체는 약간의 차이가 발생하지만 20% 이내이고, 비슷한 변화양상을 보이기 때문에 시험결과에 대한 신뢰성을 인정받을 수 있다고 판단된다.

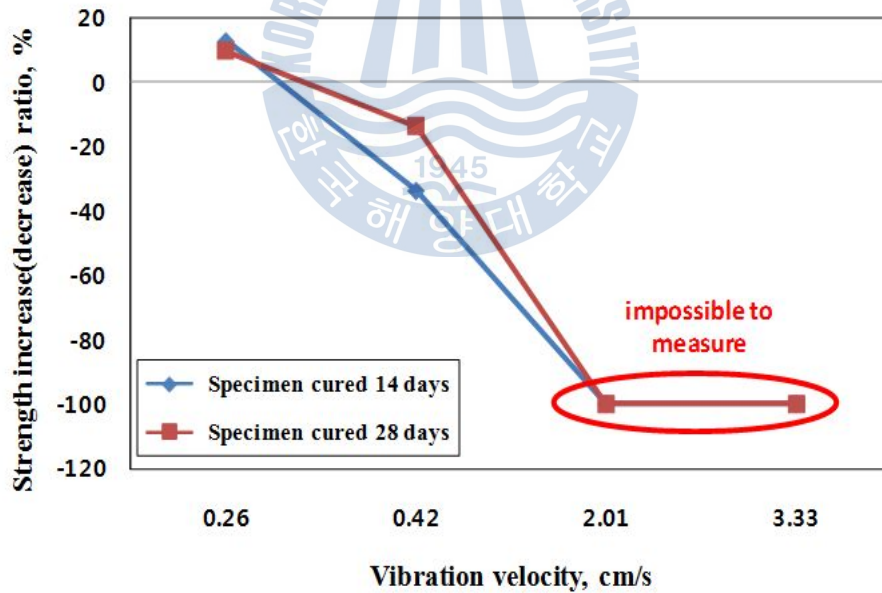


(a) Unit weight 6kN/m³

Fig. 4.11 Comparison with strength decrease about curing time (T0 specimen)
(continued)



(b) Unit weight 8kN/m^3



(c) Unit weight 10kN/m^3

Fig. 4.11 Comparison with strength decrease about curing time (T0 specimen)

제 5 장 결 론

최근 경량성토재로서 주로 사용되고 있는 EPS공법과 경량기포혼합토공법의 소성변형(크리프), 품질관리 및 확보, 재료의 불균질성으로 인한 문제를 해결하기 위하여 공장에서 대량 생산이 가능한 균질한 품질의 모래를 사용한 경량기포토를 개발하였다. 경량기포토는 재료적인 측면에서는 연구가 계속 이루어지고 있으며, 설계 및 시공에 적용되어지고 있다. 하지만 경량기포토의 현장타설 직후 발파, 차량 등에 의한 진동에 관련된 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 진동이 슬러리 상태로 양생중인 경량기포토에 미치는 영향에 관한 시험을 실시하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 초기 시험 진동을 통하여 측정된 값에 대한 검증 및 신뢰도를 높이기 위해 해당진동에 대하여 40회씩 진동을 가한 결과, 신뢰성을 확보하기 위한 결과로 판단할 수 있다고 사료된다.
- (2) 중간 크기의 진동 혹은 약간 굳은 슬러리상태에서 진동을 가하였을 때는 표면에 흰색의 물결무늬자국이 생기고 상당한 강도저하가 발생하는 반면, 큰 크기의 진동 혹은 거의 굳지 않은 슬러리상태에서 진동을 가하였을 때는 커다란 균열이나 크랙, 소포의 흔적이 보이며 재료분리현상이 나타나는 것을 알 수 있다.
- (3) 기포함유량이 많고 단위중량이 낮은 6-1-0공시체에 비해 기포함유량은 적지만 모래의 함유량이 많은 10-1-2공시체가 진동의 영향으로 압축강도의 감소율이 더 크게 나타나며 이는 경량기포토에 진동을 가하였을 때, 기포의 영향보다는 경량기포토의 골격역할을 하는 모래의 영향이 더 크다고 판단할 수 있다.
- (4) 모래를 포함하지 않은 배합의 공시체(6-1-0)에서 약한 진동에서는 거의 강도의 변화가 없는 반면, 모래를 포함하는 배합의 공시체(8-1-1)에서 0.42cm/s이하의 약한 진동에서는 압축강도가 소폭 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 경량기포토의 골격역할을 하는 모래의 다짐효과일 것으로 판단된다.
- (5) 진동속도 0.26cm/s와 0.42cm/s의 경우에는 진동의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타난 반면 2.01cm/s 이상의 진동속도에서는 압축강도의 감소율이 현저하게 증가하는 것을 알 수 있다. 기본적으로 3가지 배합비에 대한 진동속도의 변화경향은 비슷하다.
- (6) 0.26cm/s와 0.42cm/s의 진동속도를 볼 때, 6kN/m³의 공시체는 거의 변화를 찾아볼 수 없고, 8kN/m³공시체는 강도가 소폭 상승된 것을 알 수 있으며, 10kN/m³공

시체에서는 강도감소를 값이 다소 불안정한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이것으로 경량기포토의 각 재료 중에서 비중이 가장 큰 모래의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다.

- (7) 14일 공시체의 압축강도는 28일 공시체의 80%정도로 나타났으며, 양생일수에 따른 강도의 차이는 있지만 14일과 28일의 대부분 경우에서 비슷한 경향을 나타내어 시험결과에 대한 신뢰성을 인정받을 수 있다고 판단된다.
- (8) (1)~(7)까지의 분석결과를 종합하여 보았을 때, 경량기포토가 현장에 타설되었을 때 진동의 영향으로 인해 재료분리, 소포 및 강도저하 등의 현상이 나타나며 이에 대한 정량적인 규제가 요구된다. 구체적으로 진동가력시점을 고려하면, 3가지 배합 모두 비슷한 결과가 나타났다. 즉, 경량기포토가 현장에 타설된 후 5시간 이내에는 주위에 건설기계 및 발파 등의 진동이 있을 경우 압축강도의 감소율이 30%이상 나타나기 때문에 타설 시 주어진 시간 내에는 주위 진동에 대한 제한이 필요할 것으로 판단된다. 또한 진동속도를 고려하였을 때, 6kN/m^3 과 8kN/m^3 의 경우 1.2cm/s 의 진동속도를, 10kN/m^3 의 경우 0.6cm/s 의 진동속도를 진동 제한치로 규정할 필요성이 있다고 판단된다.



참고문헌

1. 김광수, 한경봉, 박선규, 박정수(2004), “수직진동이 초기양생중인 콘크리트의 강도에 미치는 영향에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 16권 5호, pp.645-650.
2. 권영웅, 임종석, 반착국, 한완균(1990), “진동이 주변 구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향”, 대한주택공사, pp.15-90.
3. 김종수, 장희석, 김명식, 김희성(2005), “초기양생 중에 수직방향 연속진동을 받은 콘크리트의 강도 특성”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 17권 2호, pp.273-279.
4. 김주철, 이종규(2002), “준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구” 한국지반공학회 논문집, 제18권, 4호, pp.309-317.
5. 김영섭(1999), “충격진동이 양생 콘크리트의 강도에 미치는 영향”, 석사학위논문, 전남대학교
6. 박건태(2001), “경량기포혼합 준설토의 강도 특성”, 석사학위논문, 단국대학교
7. 송준호, 임종철, 홍석우(2008), 원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석. 한국지반공학회 논문집, 제24권, 11호, pp.1-10.
8. 송준호(2009), “원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석”, 석사학위논문, 부산대학교.
9. 송혜금(1998), “진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구”, 석사학위논문, 서울대학교
10. 오병환, 송혜금, 조재열(1998), “진동이 양생초기 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 10권 5호, pp.81-87
11. 윤길립, 김병탁(2004), “경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제20권, 4호, pp.5-13.
12. 윤길립, 유승경(2004), “현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성”. 한국지반공학회 논문집, 제20권, 9호, pp.125-131.
13. 이영준, 김성원, 박이근, 김태형(2010), “경량기포토의 압축 및 인장 특성”, 한국지반공학회 논문집, 제 29권, 9호, pp.59-69.
14. 이지은(2000), “가력진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 역학적 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 인천대학교
15. 이수형(2005), “석분을 혼입한 경량기포혼합토의 역학적 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 건국대학교.

16. 일본도로공단(1996), “기포혼합경량토를 이용한 경량 성토공법의 설계·시공 지침서”
17. 최두리(2006), “발파진동이 콘크리트 양생에 미치는 영향에 관한 실험적 연구”, 석사학위논문, 연세대학교
18. 황중호(2010), “경량기포토의 역학적 특성”, 석사학위논문, 한국해양대학교
19. 황중호, 안영균, 이영준, 김태형(2010), “경량기포혼합토로 단기간에 시공된 확폭 도로성토체의 특성”, 대한토목학회 논문집, 제 30권, 제 4D호, pp.377-386.
20. 황중호, 안영균, 김태형(2010), “도로성토체로 사용된 실트질 계열의 경량기포혼합 토에 대한 물의 영향”, 한국지반공학회논문집, 제 26권, 2호, pp.23-32.
21. Bastian C. E. (1970), "The Effect of Vibration on Freshly Poured Concrete", Foundation Facts, Raymond International, Vol. 6, No.1, pp.14-17.
22. Esteves J. M. (1978), "Control of Vibration Caused by Blasting", Laboratorio De Engenharia Civil, Memoria No. 498, Lisbon, Portugal.
23. Howes E. V. (1979), "Effect of blasting vibrations on curing concrete", Proceedings of the Symposium on Rock Mechanics 20th, pp.455-460
24. Hulshizer A. J. (1996), "Acceptable shock and vibration limits for freshly placed maturing concrete", ACI Materials Journal, pp.524-533.
25. 土田孝, 長井興治, 湯川雅之, 岸田滄夫(1996), “山本實:岸壁の裏込め材として打設されそ輕量混合處理土の土質特性”, 港灣技研資料, No.833.

감사의 글

대학원에 입학한 지 2년이 흘러 어느덧 졸업을 눈앞에 두고 있습니다. 이제야 비로소 모든 과정을 마치고 논문의 마지막 마무리를 글로 남기려 하니 옛일이 스쳐 지나가면서 항상 최선을 다하지 못했던 자신에게 후회도 됩니다. 하지만 2년여의 시간은 지금까지 살아온 삶에서 너무나 소중한 시간이었고, 사회에 첫발을 내딛기 위한 첫걸음이었다고 생각합니다. 여러모로 많이 부족한 저이지만 이렇게 마무리하며 본 논문을 완성할 수 있도록 도와주신 많은 분들에게 머리숙여 감사드리며, 모든 분들께 일일이 찾아뵙고 감사드리지 못하는 점 용서를 구합니다.

우선 거의 4년이라는 시간동안 학문적으로, 그리고 인성적으로도 부족한 저에게 훈계와 훌륭한 가르침 그리고 때론 따뜻한 말씀으로 보듬어 주셨던 김태형 교수님의 은혜에 깊이 감사드립니다. 그리고 학부시절부터 많은 관심과 가르침으로 학문적 틀을 더욱 굳건히 만들어 주신 김태곤 교수님, 김도삼 교수님, 이중우 교수님 그리고 경갑수 교수님께 진심으로 감사드립니다. 많이 부족한 논문이었지만 열과 성을 다해 논문심사를 해주시고 지도해 주신 서영교 교수님과 박동천 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

지역혁신인력양성사업을 진행하면서 많은 도움을 주셨을 뿐만 아니라 학문적으로도 많은 가르침을 주신 지오알앤디의 박이근 박사님과 유지훈 차장님, 그리고 지아이의 김성욱 박사님, 지질자원연구소의 송영석 박사님께 감사드립니다. 그리고 항상 많은 관심과 도움으로 경량기포토 사업진행을 함께 해주신 김성원 차장님께 진심으로 감사드리며 2월달 결혼은 더욱더 축하드립니다.

4년 남짓의 연구실 생활을 이어오면서 항상 옆에서 쓴소리도 해주고 저를 바로 잡아준 웅기형에게 정말 이 감사의 글을 통해 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또한 못난 저에게 항상 칭찬으로 힘을 주는 수정누나도 정말 고맙고, 누나도 정말 고생 많았어요. 무엇이든지 잘하는 닭가슴살 먹는 성규, 영어공부 잘하는 성준이, 뒤늦게 들어왔지만 고생길이 흰한 민아, 그리고 힘들 때마다 위로도 해주고 항상 즐겁게 해준 너무나 아쉽고 고마운, 지질자원연구소에서 알바중인 남우, 해안지반연구실의 내 쌍둥이 현우, 지금은 졸업한 정현이형, 용수형, 중호형 모든 토질방 식구들은 앞으로 잊지 못할 평생의 선배 후배가 될 것 같습니다. 정말 고맙고 고맙습니다.

하리에서 자취 5년 동안 같이 살아준 비스트 현기. 5년 못 채우고 뛰쳐나간 동숙자 선옥이. 겨우 3년 살고 나간 구똥똥 동건햄. 지금의 반쪽을 이어준 뽕과마 상길이, 살안찌는 성진이, 옷 잘 입는 진호, 도로방 유나, 지금은 졸업을 했지만 학부시절 거의 항상 같이 지냈던 길태, 재학이, 선현이, 민규. 또한 즐거운 것이 있는 힘든 일이 있는

아무 일 없든 말만 하면 술 사주던 진은이형, 어리버리 효상이, 현기 여친 민지, 선욱이 여친 보배, 친해지고 싶은 민선이, 성심이, 아이폰 유저 동진이. 5년 남짓의 학교생활을 함께 해온 모든 동기들과 선배, 후배님들께 진심으로 감사의 말을 전합니다.

대학원 동기로서 같이 고생하며 지내온 소연이와 현석이형도 정말 고생 많았습니다.

항상 잘해주지 못해 미안한 마음뿐이었지만, 힘들 때 옆에서 위로해 주고 힘이 되어준 효영이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 지금은 하늘나라에 계시지만 작은아들 계속 지켜봐주시는 아버지, 아직도 아들 뒷바라지 때문에 고생하시는 엄마, 존재만으로도 항상 힘이 되어주는 형, 너무나 고맙고 사랑합니다. 앞으로도 교수님의 가르침을 되새기며, 엄마 아빠에게 부끄럽지 않는 제자, 아들이 되도록 노력하겠습니다.

2011년 1월

이영준 드림

